

**DESARROLLO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA MONITOREAR LA
POTENCIA GENERADA POR UN PANEL FOTOVOLTAICO**

PRESENTA:

JULIÁN ANDRÉS SERRANO PABÓN

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR

EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICA

DIRECTOR:

HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA (UNAB)

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMANGA, COLOMBIA.

2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DE DIRECTOR DE PROYECTO

FIRMA EVALUADOR

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, todos y cada uno de ellos en especial a mis padres quienes son todo para mí, por todo el esfuerzo, dedicación, apoyo no solo económico sino además espiritual y moral.

A mis compañeros y amigos de Ingeniería Mecatrónica y demás carreras de la UNAB quienes estuvieron conmigo cada semestre, luchando cada parcial, cada nota y siempre saliendo adelante a pesar de las circunstancias para luego disfrutar de las deliciosas recompensas que trae consigo el gran esfuerzo.

A mis docentes, directivos y ayudantes de laboratorio que sin importar que tanto trabajo tuviesen siempre estaban ahí para ayudarnos, asesorarnos y aconsejarnos en cada cosa.

CONTENIDO

OBJETIVOS	7
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
INTRODUCCIÓN	8
1 ENERGÍA FOTOVOLTAICA	9
1.1 ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA.....	9
1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO	10
1.3 INVERSORES.....	11
1.4 SEGUIDOR SOLAR	12
2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL	13
2.1. INSTRUMENTACIÓN	14
2.1.1. SENSORES DE CORRIENTE	14
2.1.2. SENSORES DE VOLTAJE	17
2.1.3. TARJETA DE MEDICIÓN.....	20
2.1.4. TARJETA DE MEDICIÓN NO INVASIVA	22
2.1.5. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	23
2.2. TÉCNICA PARA OPTIMIZAR LA ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL SEGUIDOR.....	24
3 DISEÑO DE SISTEMA DE MONITOREO MPUNAB	28
3.1 PROGRAMACIÓN LABVIEW Y CALIBRACIÓN	29
3.1.1. BLOQUES DE POTENCIA	29

3.1.2. PROGRAMACIÓN PARA EXPORTAR DATOS	30
3.1.3. PROGRAMACIÓN PARA IMPORTAR DATOS DE EXCEL	31
3.1.4. CALIBRACIÓN.....	32
3.2. INTERFAZ GRÁFICA DE MONITOREO.....	33
3.2.1 DATOS DE LA RED DE PANELES	34
3.2.2 GRÁFICA DE LA SALIDA DE LOS PANELES	36
3.2.3 IMPORTAR DATOS DE MICROSOFT EXCEL	37
3.3 EFICIENCIA ENTRE LOS PANELES	38
3.3.1 SIMULACIÓN CON SOFTWARE PVSYST	39
3.3.2 THE ENERGY DETECTIVE (TED).....	40
3.3.3 SISTEMA DE MONITOREO DE PANELES SOLARES UNAB.....	42
4 CONCLUSIONES.....	43
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXOS	47
ANEXO 1 PSEUDOCÓDIGO PARA SEGUIDOR SOLAR	47
ANEXO 2 DATASHEET PANEL SOLAR	54
ANEXO 3 DATASHEET INVERSOR	54
ANEXO 4 DATASHEET SENSOR SCT-013-030.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del panel seguidor solar.....	13
Figura 2 Circuito de medición de corriente.....	16
Figura 3 Circuito fuente (18)/(0)/(-18) VDC.....	20
Figura 4 Tarjeta de medición.....	21
Figura 5 Circuito para tarjeta de medición no invasiva.....	22
Figura 6 Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008.....	23
Figura 7 Ecuación Ángulo vs Día del año vs Tiempo para ubicación en Bucaramanga.....	26
Figura 8 Representación de ángulo del panel vs Hora del día.....	26
Figura 9 Ecuación del tiempo modificada.....	27
Figura 10 Bloque de potencia eléctrica.....	30
Figura 11 Programación de exportación de datos.....	31
Figura 12 Importación de datos a labview.....	31
Figura 13 Pestañas de la interfaz.....	34
Figura 14 Indicadores principales de los paneles.....	35
Figura 15 Datos generales de los paneles.....	36
Figura 16 Voltaje y corriente de cada panel.....	36
Figura 17 Potencia diaria de cada panel.....	36
Figura 18 Menú despegable para las graficas.....	37
Figura 19 Tabla de base de datos.....	38
Figura 20 Visualizador de variables.....	38
Figura 21 Energía reinyectada vs Hora (Panel Estático).....	40
Figura 22 Energía Reinyectada a red, Plano Acimut vs Hora (Seguidor Solar)	40
Figura 23 Potencia generada Seguidor TED-MPUNAB vs Hora.....	41
Figura 24 Eficiencia panel seguidor % vs Muestras.....	42
Figura 25 Potencia Activa Panel Seguidor-Estático vs Hora.....	42
Figura 26 Eficiencia del seguidor solar vs Hora.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones mecánicas y componentes del panel solar	10
Tabla 2 Características eléctricas del panel solar	11
Tabla 3 Especificaciones técnicas de inversor Enphase M215 Microinversor	12
Tabla 4 Criterios de selección de sensores de corriente	15
Tabla 5 Criterios de selección de sensores de voltaje	18
Tabla 6 Descripción de entradas y salidas del sistema	21
Tabla 7 Características de circuito no invasivo	23

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una interfaz gráfica en el software LabView, que permita monitorear la potencia generada por un panel fotovoltaico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar los sensores que permiten registrar la tensión y corriente generada por un panel solar.
- Establecer una estrategia de control para optimizar la máxima transferencia de energía del panel solar.
- Determinar la eficiencia energética de un seguidor solar de un eje y un panel solar estático, implementados en el Laboratorio de Energías Renovables.

INTRODUCCIÓN

El proyecto de grado surge de una serie de iniciativas que se han venido desarrollando en la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB) encaminadas a la investigación sobre energías renovables. En este sentido, en el año 2014 se desarrolló un proyecto de grado basado en el diseño y montaje de un sistema de seguimiento solar automático de un eje, para el panel fotovoltaico ubicado en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), se realizó el montaje del panel e implemento un programa en el sistema Arduino que permitió el control del seguidor, basándose en la trayectoria realizada por el sol durante el día, la cual tiene en cuenta la hora, la fecha y la ubicación del panel. La anterior información la pudo obtener de un reloj en tiempo real (RTC). Es necesario monitorear la potencia del panel, y para esto se diseñó un sistema de monitoreo de redes eléctricas donde se diseñó una tarjeta de medición que permite obtener las señales de corriente y voltaje del módulo, estas señales son enviadas a un software que muestra las diferentes características eléctricas del panel fotovoltaico junto con una base de datos donde se almacena la información. Este proyecto hace parte de la propuesta de investigación "Análisis teórico-experimental de la viabilidad técnica y económica de implementar seguidores solares de un eje en Colombia.

1 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía solar hoy en día representa la segunda fuente de energía renovable de mayor penetración en el mundo, después de la eólica, en el año 2013 está superó por primera vez el crecimiento de la energía eólica en el mundo presentando un aumento anual de 55% en los últimos 5 años.¹

1.1 ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA

El consumo energético se desarrolla al mismo ritmo que lo hace el hombre. Esto nos lleva a consumir cada día más energía sin importar la fuente de su generación ya que la energía es considerada una necesidad del ser humano. De aquí nace la preocupación por utilizar de manera eficiente recursos energéticos y se crea un nuevo concepto que hoy en día es mencionado y aplicado a nivel mundial, energías renovables.

En Colombia la principal fuente energética son las plantas hidroeléctricas, seguidas de los combustibles fósiles, las energías renovables en el país aún son muy excluidas, sin embargo un estudio del Programa de asistencia para la administración del Sector energético del Banco Mundial, muestra que la sola explotación suficiente de energía eólica podría cubrir más de lo que el país necesita.

Los mejores vientos de Suramérica se encuentran en Colombia, en el departamento de la Guajira, igualados únicamente con los vientos de la Patagonia en Argentina; si se utilizara el 100% del potencial del departamento de la Guajira

en energía eólica, sería suficiente para satisfacer dos veces la demanda nacional de energía.²

Los paneles solares son utilizados mayormente en zonas rurales, donde la conexión a la red nacional es muy costosa, y los paneles solares suplen la demanda de energía en estos lugares.

1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

“Los módulos son el principal componente de las instalaciones fotovoltaicas, además de tener que producir energía por más de 25 años, deben resistir las más rigurosas variaciones atmosféricas” [1]. También se conocen como paneles solares y están formados básicamente por células solares conectadas entre sí y protegidas de los efectos de la intemperie.

Los paneles utilizados en el laboratorio tienen características muy básicas en cuanto a la capacidad de generación se refiere, debido a que generan un máximo de 225Wh, en la Tabla 1 y 2 se muestran las principales características mecánicas y eléctricas del módulo.

Tabla 1 Especificaciones mecánicas y componentes del panel solar³

Datos Mecánicos y Componentes	
Tecnología	Poly
Dimensiones del Panel	64.96 x 38.98 x 1.57 Pulgadas

Peso del Panel	42.1 Libras
Células por Módulo	60
Material del Marco	Aluminio
Hoja posterior del Material	Blanca
Conector del Módulo	Amphenol
Cable de Salida	Alambre PV

Tabla 2 características eléctricas del panel solar

Características eléctricas	
Clasificación del Sistema	250 watts
Watts (PTC):	226.2 Watts
Máximo Voltaje con Carga (Vmpp)	30.4 Volts
Máxima Corriente con Carga (Impp)	8.24 Amps
Voltaje sin Carga (Voc)	38.4 Volts
Corriente de corto circuito (Isc)	8.79 Amps
Máximo Voltaje del Sistema	600 Volts
Máxima corriente del Fusible	15 Amps
Máxima eficiencia del Módulo	15.3 %

1.3 INVERSORES

Los inversores de voltaje transforman la corriente continua (cc) de baja tensión (12v, 24v, 32v 36v o 48v) en corriente alterna (ac) de alta tensión (110v, 220v). El cambio de voltaje es necesario dado que los aparatos eléctricos se alimentan de uno u otro tipo de corriente, como referencia, la gran mayoría de los aparatos eléctricos presentes en hogares y oficinas requieren de corriente alterna.

El inversor que se encuentra instalado en los paneles es un Enphase® M2, la ventaja de este tipo de inversor es que incorpora un regulador de potencia reactiva que disminuye el consumo de corriente en la red. Además de las características técnicas que se muestran en la Tabla 3. [2]

Tabla 3 Especificaciones técnicas de inversor Enphase M215 Micro inversor⁴

Datos Técnicos	Enphase® M215 Microinverter
Entrada (DC)	
Máxima Potencia DC	190 - 270 W
Máximo Voltaje DC	48 V
MPP Rango de Voltaje	27 V - 39 V
Voltaje DC nominal	16 V - 48 V
Voltaje DC min/Max	22 V / 48 V
Máxima Entrada de Corriente	15 A
Salida (AC)	
Potencia Nominal AC	215 W
Máxima Potencia Aparente AC	225 VA
Voltaje Nominal AC	230 V
Frecuencia AC	50, 60 Hz +- 4.5 Hz
Máxima Corriente de Salida	0.94 A

1.4 SEGUIDOR SOLAR

El seguidor solar implementado en la universidad por el egresado Anthony Atencio, del programa de Ing. Mecatrónica del año 2014 en su el proyecto de grado “*Diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar para paneles fotovoltaicos*” consiste en una estructura en aluminio para el panel solar de la tabla 2, que consta de un motor lineal alimentado a 24Vdc con una capacidad de carga de hasta 6000N y un desplazamiento de 150mm, junto con un microcontrolador Arduino UNO equipado de un puente H Pololu VNH5019 para realizar el cambio de giro del motor y un reloj en tiempo real RTC DS3231 para identificar la hora en el transcurso del día, y potenciómetro lineal para determinar la posición del panel.

En la Figura 1, se ve el panel ubicado en el laboratorio, la estructura con los refuerzos en aluminio, el motor lineal, la caja de control y el potenciómetro lineal ubicado en el sentido opuesto al motor, el potenciómetro lineal entregaba lectura superiores a 3 V y esto producía una saturación en el microcontrolador debido a que la entrada máxima de voltaje que podía entrar a los pines análogos era de 1V, para esto se utilizó un divisor de tensión, se calibró nuevamente la posición del panel con un giroscopio garantizando el movimiento de 60 a 150 grados de forma lineal. La ecuación que representa la calibración del panel es la Ecuación 1, donde es el valor actual de tensión en el potenciómetro.

$$\textit{Angulo} \quad (1)$$

Figura 1 Estructura del panel seguidor solar

2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL

Para el desarrollo del proyecto se debe hacer una selección de sensores acorde a los requerimientos que la interfaz necesite, como es el caso de mostrar toda la

forma de onda de la señal sinusoidal y rangos de salida que no superen los de la tarjeta de adquisición de datos, para realizar la búsqueda de la instrumentación adecuada se estableció con el profesor encargado del laboratorio de energías renovables que el software debe mostrar las componentes de potencia entregada por los paneles, además debe poder definir el usuario el muestreo al que desea adquirir los datos.

Para la automatización del sistema de control del panel se revisó el modelo matemático programado en el microcontrolador en el proyecto "*Diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar para paneles fotovoltaicos*" del ingeniero Anthony David Atencio Moscote para establecer los puntos a mejorar, esto se mostrara en el capítulo 2.2

2.1. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación de esta tesis está basada principalmente en la medición de la potencia AC (Corriente Alterna) a la salida de los inversores, para realizar este cálculo se requieren sensores de corriente y de voltaje para cada módulo.

2.1.1. SENSORES DE CORRIENTE

Para realizar la selección de sensores primeramente se identificó las características básicas que debe tener el sensor y estos fueron los criterios:

- Criterio 1 No invasivo: el propósito es alterar lo menos posible la red eléctrica a la cual se va a implementar el sistema.
- Criterio 2 Rango del sensor no superior a los 2A: la salida del inversor con el panel al 100% de su potencia genera una corriente de hasta 0.8A, manejando un factor de seguridad de 2.5 la capacidad máxima seria la

indicada anteriormente esto con el objetivo de aprovechar toda la resolución del sensor.

- Criterio 3 Salida de señal analógica de voltaje o corriente: la DAQ de National Instruments recibe entradas análogas de voltaje de -10/10V y de corriente de 4-20 mA.
- Criterio 4 Salida con el espectro de la onda sinusoidal: para poder calcular el factor de potencia de los paneles, es necesario conocer el valor del desfase de la onda de corriente con respecto a la onda de voltaje.

En base en estos criterios se realizó una tabla comparativa de los diferentes sensores en el mercado. *Tabla 4.*

Tabla 4 Criterios de selección de sensores de corriente

Sensores	Criterios			
	1	2	3	4
ACS712ELCTR-05B-T (sensor de corriente). ⁵ Invasivo, Corriente máx. 30A, salida de 0,5-4.5vdc, Valor RMS	x	✓	✓	x
TA12-100 sensor de corriente. ⁶ No invasivo, Corriente máx. 5A, salida de 0-5mA, Valor RMS	✓	✓	x	x

SCT-013-030 Splilt-core current transformer ⁷ No invasivo, Corriente máx. 30A, salida de 0-1V, Valor RMS	✓	✓	✓	✗
NI 9227 National Instruments ⁸ Invasivo, corriente máx. 5A rms, Puerto Serial, Sinusoidal	✗	✓	✓	✓
TED modelo GX 201-CT ⁹ No invasivo, corriente máx. 200A, Salida de 0-3V, Sinusoidal	✓	✗	✓	✓

Luego de comparar diferentes sensores de corriente que se encuentran en el mercado se identificó que el criterio de la señal sinusoidal de la corriente es fundamental para realizar el proyecto y esto solo lo suplía el TED modelo GX 201 - CT y el NI 9227, sin embargo este segundo excede el presupuesto (COP 4.478.000), mientras que el primer sensor estaba siendo utilizado para realizar pruebas de generación de energía de estos mismos paneles, como la instrumentación no se ajusta al presupuesto y no estaba siendo utilizada, se pasó a la etapa de desarrollo de un sistema análogo que entregará la señal completa de la corriente a 60hz, el circuito que se desarrolló fue el de la Figura 3.

Figura 2 Circuito de medición de corriente

La *Figura 3* es el circuito que cumplió el criterio número 4, el amplificador de instrumentación INA117P es un amplificador de alta tensión, que trabaja con frecuencias de 60hz y con voltajes AC de hasta 500V, el dispositivo con ganancia unitaria resta la caída de potencial de la resistencia de 10 Ohm, esta caída de voltaje es muy pequeña por lo tanto no afecta a la carga final que se le aplique a la red. La ley de Ohm nos indica que “el valor de la corriente es la intensidad de la corriente que circula entre dos puntos de un circuito eléctrico es proporcional a la tensión eléctrica entre dichos puntos”, se diseñó con una resistencia de 20 Watts para que disipara un máximo de corriente de hasta 1.4A suficiente para la corriente entregada por los inversores. Ecuación 2.

(2)

La salida de voltaje del circuito es proporcional al valor de la corriente que circula por la resistencia de 10 Ohm, el diferencial de voltaje se divide en 10 para conocer el valor real de corriente que tendría la carga aplicada a la red como se muestra en la ecuación 3, este circuito valida los criterios 2,3 y 4, principales para el desarrollo el proyecto.

(3)

2.1.2. SENSORES DE VOLTAJE

El sensor de voltaje que se busca es uno que cumpla los mismo criterios del sensor de corriente a diferencia del criterio 2 el cual no se busca un pico máximo de corriente de entrada si no un pico máximo de voltaje de entrada los criterios serían los siguientes.

- Criterio 1 Rango del sensor superior a los 230VAC: El inversor trabaja con un voltaje nominal AC de 230V y este voltaje lo entrega a su máxima capacidad de potencia.
- Criterio 2 Salida de señal análoga de voltaje o corriente: la DAQ de National Instruments recibe entradas análogas de voltaje de -10/10V y de corriente de 4-20 mA.
- Criterio 3 Salida con el espectro de la onda sinusoidal: para poder calcular el factor de potencia de los paneles, es necesario conocer el valor del desfase de la onda de corriente con respecto a la onda de voltaje.
- Criterio 4 No invasivo: el propósito es alterar lo menos posible la red eléctrica a la cual se va a implementar el sistema.

La tabla correspondiente a los sensores de voltaje posibles para la realización del proyecto se presenta a continuación.

Tabla 5 Criterios de selección de sensores de voltaje

Sensores	Criterios			
	1	2	3	4

Sensor de Voltaje Arduino ¹⁰ Voltaje Max 25VDC, Salida de 0-5V, Salida RMS, Invasivo	x	✓	x	x
VoltageWatch V8-T7-5 ¹¹ Voltaje máx. 480VAC, Salida 4-20mA, Salida RMS, Invasivo	✓	✓	x	x
NI 9225 National Instruments ¹² Voltaje máx. 300vrms, salida4-20mA, Señal 60hz, Invasivo	✓	✓	✓	x
Sensor for Arduino Mega FZ1440 Voltaje máx. 240 VAC, salida 0-5 VDC, Salida RMS, invasivo	✓	✓	x	x

El sensor de voltaje indicado para esta aplicación es el sensor NI 9225 de National Instruments cumple con los criterios principales de selección, sin embargo se cotizó el sensor y excede el presupuesto del proyecto (COP 6.720.000). Se planteó la opción de mandar a diseñar un transformador AC-AC de 220VAC a 6VAC de baja potencia, esto con el objetivo de cumplir con los criterios 1,2 y 3 a un bajo costo.

El criterio número 4 no se cumplió para ningún sensor, sin embargo es un criterio que no es de vital importancia para este tipo de instrumentación.

El valor de voltaje de salida es 29.33 veces más pequeño que el de entrada, es un transformador de baja potencia 1.2VA a la salida, con estas características se redujo considerablemente el tamaño del transformador.

2.1.3. TARJETA DE MEDICIÓN

Luego de la etapa de selección de sensores se prosigue al desarrollo de la tarjeta de control donde se llevará a cabo el censado de todas las señales, se debe organizar de tal forma que todos los elementos tengan su espacio para disipar el calor de trabajo de cada elemento.

Primeramente se identificó que circuitos requieren una alimentación externa para su funcionamiento, para este caso el amplificador INA 127P requiere una alimentación de 18vdc y -18vdc, y una corriente de 14mA, por lo tanto se diseñó una fuente con tap central con capacidad de 500mA (Figura 5.), para conseguir el voltaje negativo que requiere el integrado y tener un rango amplio de suministro de corriente.

Para suplir los criterios de diseño, se utilizó un transformador de 110vac a 18vac RMS, con tap central de 9VA, para rectificar la señal se utilizó un puente de diodos de 3A para evitar que una sobre corriente dañe el circuito regulador, luego se utiliza un condensador de 2200 uF encargado regular lo más posible la señal ac que viene del puente de diodos, otro capacitor en paralelo de 100 uF también es utilizado para empezar a eliminar el rizado que entra el regulador LM7818 y LM7918 que tiene una salida máxima de corriente de 1A suficiente para suplir los amplificadores, con esto tenemos una fuente de 18 y 18Vdc con potencia máxima de 9VA limitada por el transformador.

Figura 3 Circuito fuente (18)/(0)/(-18) VDC

Finalmente todos estos elementos se configuran dentro de un mismo circuito para realizar el PCB donde se integrarán cada uno de los sensores, el PCB debe estar

organizado para su debida instalación en el lugar donde se realizarán las mediciones.

El circuito de la *Figura 6*. Fue previamente probado en un protoboard para verificar su funcionamiento, por último para prevenir cortos con otros cables que puedan estar ubicados en el área se aísla el circuito en una caja en acrílico con solo los pines de entrada y el cable USB de la tarjeta de adquisición de datos.

Figura 4 Tarjeta de medición

Tabla 6 Descripción de entradas y salidas del sistema

Jumper	Descripción
1	Entrada de voltaje para transformador 110 AC
2	Entrada voltaje de la resistencia de 10 Ohm Seguidor
3	Entrada de voltaje 220 Vac Seguidor
4	Entrada voltaje de la resistencia de 10 Ohm Estático
5	Entrada de voltaje 220 Vac Estático
6	Salida de voltaje 6 Vac Estático

7	Salida de valor de la corriente en voltaje de 8vac Estático
8	Salida de voltaje 6 Vac Seguidor
9	Salida de valor de la corriente en voltaje de 8vac Seguidor

2.1.4. TARJETA DE MEDICIÓN NO INVASIVA

En los paneles solares siempre se usan inversores para convertir la energía DC en AC, para que pueda ser utilizada en una red doméstica, algunos de estos inversores presentan características que afectan su funcionamiento cuando no están conectados directamente a la red eléctrica, en el caso de los inversores Enphase® M215 tienen efectos de carga, cuando se desea conectar sobre una de las fases un resistencia, esto modifica la impedancia interna del inversor afectando críticamente el funcionamiento del mismo.

Para evitar este inconveniente se utilizó el sensor de corriente no invasivo TED modelo GX 201-CT que entrega por medio del campo magnético inducido por corriente que pasa por la fase del inversor un valor de voltaje proporcional a la magnitud de esta, estos sensores son llamados de efecto Hall. El funcionamiento de este circuito es más sencillo que el invasivo y no requiere fuente de alimentación externa.

En la Figura 5 se observa el circuito para medir voltaje y corriente de forma no invasiva, los dos transformadores de la izquierda y la derecha son las lecturas de tensión de cada panel y jumper central es la lectura de corriente de las pinzas la parte izquierda número 2 es para el estático y la número 3 para el seguidor.

Figura 5 Circuito para tarjeta de medición no invasiva

Tabla 7 Características de circuito no invasivo

Jumper	Descripción
1	Entrada de voltaje 220 Vac Estático
2	Entrada de pinza Estático
3	Entrada de pinza Seguidor
4	Entrada de voltaje 220 Vac Seguidor
5	Salida de voltaje 6 Vac Seguidor
6	Salida de pinza Seguidor
7	Salida de pinza Estático
8	Salida de voltaje 6 Vac Estático

2.1.5. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008 de National Instruments, tiene la capacidad a diferencia de las otras tarjetas como Arduino de leer voltajes análogos negativos, este tipo de señal para el proyecto es de vital importancia ya que las señales que entrarán a la tarjeta serán de tipo sinusoidal, con cruce por cero, además se acopla perfectamente debido a que es del mismo fabricante del software LABVIEW. La Tarjeta DAQ 6008 cuenta con cuatro entradas análogas, cada una con su identificación positiva y negativa de la entrada, estas prestaciones son las necesarias para realizar el proyecto, en la Figura 6 se muestra una imagen de la tarjeta.

Figura 6 Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6008

2.2. TÉCNICA PARA OPTIMIZAR LA ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL SEGUIDOR

El sistema de control del seguidor solar implementado en el laboratorio de energías renovables, está basado en la ecuación del tiempo que considera diferentes parámetros como latitud y altitud, y fecha para identificar la posición del sol en una determinada ubicación geográfica.¹³

Para calcular la hora solar es necesario usar la ecuación del tiempo ET, (5), donde es el ángulo de desviación según el día consecutivo del año , (4), asumiendo como el primero de enero y el treinta uno de diciembre.

(4)

(5)

A partir de las expresiones anteriores se determina el tiempo solar , Ecuación (6), donde es la hora local.

(6)

En primer lugar se determina a partir de la ecuación 7 el ángulo de declinación de la Tierra (δ) debida al movimiento de traslación, donde N es el día consecutivo del año que se desea conocer.

(7)

El ángulo horario (h) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, es decir, es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora de referencia, que se obtiene por la ecuación (8) donde t es el tiempo solar determinado en (6).

(8)

Con las ecuaciones (7), (8) y la latitud (ϕ) en la cual se va ubicar el panel solar, es posible determinar la altura del sol h .

(9)

El ángulo azimut del sol está dado por (10).

(10)

El seguidor solar gira sobre un eje horizontal norte-sur y el panel fotovoltaico se ubica paralelo al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a

oeste perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene. Este ángulo de inclinación se puede determinar a partir de (11).¹⁴

(11)

En la figura 7. Se puede ver la ecuación (11) del ángulo de control expresada en el transcurso del año para la latitud de Bucaramanga el sol representa una línea recta, donde h es la altura solar y α es el ángulo acimut.

Figura 7 Ecuación Angulo vs Día del año vs Tiempo para ubicación en Bucaramanga.

Sin embargo si este modelo representa de forma correcta la pendiente de la recta del movimiento del sol durante el día, tiene falencias en la representación de algunos valores de ángulo en determinados días del año como se ve en la *figura 8*.

Figura 8 Representación de ángulo del panel vs Hora del día.

En la anterior gráfica se puede ver que esta ecuación del tiempo para determinados días en el año como es el caso de la indicada en la gráfica el día 4 de abril, a las 6 de la mañana está mostrando que el sol se encuentra a 179.9° respecto a la horizontal del panel, y este valor hace referencia una posición que

solo se puede alcanzar en horas superiores a las 5 de la tarde, por lo tanto fue necesario reestructurar la programación del sistema de control del seguidor solar.

Utilizando la ecuación del sol en los rangos de tiempo durante los días del año en el que la ecuación presenta un comportamiento lógico se determinó la pendiente, y a partir de ahí se estableció una dinámica del panel para cualquier día del año representada por un modelo en función de la hora, constituida mediante una recta, y con la ecuación 5.

(12)

Figura 9 Ecuación del tiempo modificada

En la *Figura 9*. Está representado el movimiento del sol durante el día para la ubicación del panel en el laboratorio. Este es el resultado de la implementación de la pendiente generada por la ecuación del tiempo y la calibración del panel por medio de un acelerómetro que identifica el ángulo de inclinación de este, y junto con una herramienta ubicada perpendicularmente al panel para visualizar la perpendicularidad del sol sobre la herramienta.

Finalmente el pseudocódigo que se utilizó tiene en cuenta las limitaciones mecánicas que tiene la estructura del seguidor, por lo tanto se puso un saturador con límite inferior de 60° y límite superior de 150° , los rangos de trabajo del seguidor fueron modificados a las 6 de la mañana debido a que la salida del sol en Bucaramanga es a las 5:35 am para la mayoría de días en el año, el seguidor trabaja 12 horas continuas, y 12 horas en estado de reposo en la posición de 100° para que los vientos que pasen en la jornada nocturna sobre él no afecten la estructura, el valor SP de 100° se fija en este ángulo debido a la zona muerta que presenta el actuador del 10% de pwm.

El controlador que se implementó es un proporcional derivativo con constante proporcional de 2.5 y constante derivativa 0.5, a un tiempo de muestreo de 10 ms, cuando la acción de control es inferior a 10% el actuador se apaga para evitar gastos adicionales de energía, la ecuación (13) precisa la ecuación del compensador aplicado al panel.

(13)

3 DISEÑO DE SISTEMA DE MONITOREO MPUNAB

El desarrollo de la interfaz está basado en distintos tipos de software comerciales que tienen el mismo objetivo como lo es el The Energy Detective (TED), mostrar el consumo o generación de potencia a través de un software que administre toda la información diaria de la red eléctrica con sensores ubicados sobre la caja de alta tensión del lugar donde estará situado el sistema.

LABVIEW de National Instruments es un software de programación gráfico orientado a proyectos en los que tener una interfaz gráfica es primordial, esta empresa además cuenta con tarjetas de adquisición de datos de bajo costo que permiten una fácil integración de hardware con software que facilitan la adquisición de señales para integrarlas a la programación hecha con el programa, también permite realizar un software ejecutable con el sello de la empresa que lo desarrolló sin la privación de tener las licencias para ejecutarlo.

3.1 PROGRAMACIÓN LABVIEW Y CALIBRACIÓN

La programación de estos bloques fue realizada en el orden que se muestra a continuación, esto con el objetivo de identificar el tipo de señales que se ingresarían a la base de datos, y el tipo de gráficos que se importaban a la interfaz.

3.1.1. BLOQUES DE POTENCIA

El software de programación Labview cuenta con un complemento para tratar señales eléctricas que trabajan frecuencia y magnitudes industriales, la librería “Electrical Power Measurement”¹⁵

Figura 10 Bloque de potencia eléctrica

El primer bloque de izquierda a derecha de la *Figura 10* es el RMS¹⁶, indica el valor eficaz de la señal de entrada, uno para cada señal de corriente y voltaje, el tercer bloque es para determinar el valor de la frecuencia de la señal, el cuarto bloque indica los cálculos de potencia con la señal de corriente y voltaje, este bloque es muy completo ya que calcula el desfase entre la onda sinusoidal de corriente respecta a la de voltaje y determina cuatro características de potencia AC primordiales, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia, con estas características se puede determinar el tipo de carga que está en la red eléctrica y que tanta potencia activa es la que realmente se está usando. Por último se encuentra el bloque de energía que determina el consumo de potencia por hora, igualmente derivado en las tres componentes de potencia.

3.1.2. PROGRAMACIÓN PARA EXPORTAR DATOS

Para exportar los datos se utilizó principalmente el bloque “Write to measurement file¹⁷”, con este bloque se puede seleccionar el tipo de archivo con el que se va a guardar la información para este caso .xlsx es el tipo de datos para archivos en Microsoft Excel, crear un archivo nuevo cada determinado periodo de tiempo o a

una determinada hora, crear un columna con el vector de tiempo de la señal y otras características determinantes para crear un base de datos.

Figura 11 Programación de exportación de datos

El programa de exportación se hace en Case Structure que depende del tiempo de muestreo en segundos, cada que se cumple el tiempo establecido el Elapsed Time, envía un valor verdadero al case Structure ejecutando el guardado de los datos a un tiempo determinado por el usuario, dentro del case se da el nombre de cada variable leída, y se multiplexa para entrar al canal del Write to measurement file, debido a que el programa será un ejecutable se creara una carpeta en el disco local C de la computadora para empezar a crear la base de datos. El programa buscara una carpeta con el nombre indicado, si la encuentra guardara ahí los datos, sino la encuentra creara una creara una carpeta y creara el archivo dentro de la carpeta.

3.1.3. PROGRAMACIÓN PARA IMPORTAR DATOS DE EXCEL

Para importar los datos de una tabla de Excel se determina inicialmente el tipo de dato de la tabla, para este caso debido a que se tienen los nombres de las columnas, solo se puede crear una tabla tipo string para visualizar los datos, para poder tratar estos valores se debe utilizar el bloque “String to Number Function”, este bloque indica el valor real de los números en formato String para poder ser graficados o utilizados para hacer operaciones con números reales.

Figura 12 Importación de datos a labview

La idea es tener una gráfica de alguna variable vs el tiempo, para esto se utilizó el bloque “Index Array Function” esto con el objetivo de poder seleccionar la columna de tiempo vs una de las 6 variables que se pueden visualizar en la base de datos. Finalmente se ingresan estos dos valores a un “Bundle Function” para definir los valores X y Y de la gráfica.

3.1.4. CALIBRACIÓN

La calibración es la etapa más importante en el desarrollo de la interfaz, muchos factores en un circuito pueden estar afectando la respuesta final la respuesta final del sistema, y más cuando se trata de un sistema hardware y software, para el caso de la tarjeta de medición cuenta con dos embobinados que desfazan la señal periódica AC de la red de paneles un valor determinado, para corregir este desfase se utiliza el bloque “Reference Signal Processing” este bloque fija el cruce por cero en un ángulo determinado de la señal, para el caso los transformadores utilizados se desfasa 125° grados para la señal del seguidor y 90° para la señal del panel estático, este valor se calibra con el valor del factor de potencia que mide un vatímetro para garantizar que el desfase de la corriente respecto al voltaje sea el indicado por el instrumento de medición.

El otro aspecto a calibrar es el de los sensores, Estos deben tomar el valor RMS real medido desde un multímetro. Como las señales análogas pasan a un convertidor de 14bits de la tarjeta de adquisición de datos, se debe escalar y tratar las señales, para el caso del sensor de corriente las señales que se obtienen son de magnitudes muy pequeñas, donde 610mA están representados con 9,52 mV rms, por esto se debe hacer un escalamiento de la señal y una linealización del sensor para que trabaje en los rango que el sistema requiere. La ecuación (14) representa el valor de la corriente para una entrada de voltaje proporcional a la corriente.

La magnitud de esta señal de voltaje es tan pequeña que fue necesario aplicarle un filtro para eliminar ruidos externos a la señal que se quiere leer del sensor. Esto se aplicó con el bloque “Filter”, Figura 13 configurando un filtro pasa bajos de primer orden a 60Hz.

Figura 13 Filtro y bloque de cruce por cero

Para validar los registros de corriente y de voltaje del sistema de monitoreo se utilizó una vatímetro AMPROBE de 10A, para rectificar los valores adquiridos por la tarjeta de adquisición y los datos reales de la red.

Tabla 8 validación registros de corriente y voltaje

Validación de registros de corriente		Validación de registros de voltaje	
Vatímetro AMPROBE	MPUNAB	Vatímetro AMPROBE	MPUNAB
0,37 A	0,376 A	223,9 Vac	223,96 Vac
0,45 A	0,458 A	226,4 Vac	226,52 Vac
0,51 A	0,505 A	229,3 Vac	229,61 Vac
0,64 A	0,623 A	231,2 Vac	231,59 Vac
0,86 A	0,836 A	232,5 Vac	232,73 Vac

3.2. INTERFAZ GRÁFICA DE MONITOREO

Para realizar un buen monitoreo eléctrico del lugar es necesario identificar qué tipo de cargas se le está aplicando a la red, para conocer con detalle esta información es necesario conocer el desfase que hay entre las señales de voltaje y corriente, este desfase identifica la potencia activa real que es inyectada a la red.

Para hacer uso de la interfaz es necesario inicialmente instalar el software que se encuentra en el CD o en el dispositivo de almacenamiento y seguir los pasos que se indiquen en el asistente de instalación, luego se debe asegurar que el cable USB que sale de la caja de medición esté conectado a un puerto COM del computador, (la conexión fue satisfactoria si en la caja de medición la DAQ tiene un bombillo LED verde parpadeando), más adelante se indicara como configurar el dispositivo.

La interfaz se divide en 3 pestañas básicas: “Datos de la red de paneles”, “Grafica de la salida de los paneles” y “Importar datos de Microsoft Excel”. Figura 14.

Figura 14 Pestañas de la interfaz.

3.2.1 DATOS DE LA RED DE PANELES

En la pestaña de “Datos de la Red de Paneles”, se encuentran los indicadores principales que se requieren para el monitoreo del panel estático y el panel seguidor, esta pestaña se divide en tres secciones, a la izquierda se visualizan los datos correspondientes al panel solar seguidor (*Figura 15.*), en el centro se

muestran datos generales de los dos paneles (*Figura 16.*), y a la derecha se muestran de igual forma que en el panel seguidor los datos del panel estático.

En la *figura 15.* Se muestran los valores RMS de las señales de corriente y de voltaje que son inyectados a la red por los inversores de los paneles, estos valores se muestran por medio de unos indicadores que en el caso de la corriente va de 0 a 1 Amper debido a que esta es la máxima corriente que puede entregar el inversor por fase, y en el caso del voltaje se distribuye de 100 a 230 Volts, como límite inferior se utilizó 100 V para visualizar fácilmente leves fluctuaciones en el potencial eléctrico entregado por el inversor, en la parte inferior se entra la paleta de potencia, en esta área gracias a instrumentación utilizada se puede registrar los valores de “Potencia Aparente”, “Potencia Activa”, “Potencia Reactiva” y “Factor de Potencia”.

Figura 15 Indicadores principales de los paneles

La *Figura 16.* Tiene indicadores muy puntuales y necesarios, en la parte superior se indica la fecha y tiempo real de los datos que se muestran en la interfaz, luego tenemos el indicador de frecuencia se muestra la magnitud de esta característica para la señal de voltaje de la red, seguidamente tenemos uno de los indicadores más importantes a la hora de usar la interfaz, en el pad de control “DAQ” se debe identificar antes de ejecutar el programa, el dispositivo de adquisición de datos que fue conectado al computador, y por último se encuentra un indicador que muestra la potencia activa entregada a la red por los dos paneles tanto el seguidor como el estático, sumando los valores en tiempo de real de las potencias de ambos módulos además como los inversores son bifásicos el valor de la potencia suministrada a la red es 2 veces la potencia entrega por una sola fase.

Figura 16 Datos generales de los paneles

3.2.2 GRÁFICA DE LA SALIDA DE LOS PANELES

En la pestaña “Gráfica de salida de los Paneles” se muestran tres gráficos distintos en la parte izquierda se muestran las señales tanto de voltaje como corriente para los dos paneles, en la parte derecha se muestra el gráfico comparativo diario de la generación de potencia activa del panel seguidor solar y el estático.

En el primer bloque de la *Figura 17* se muestra la forma de onda sinusoidal de la señal de voltaje para cada panel en un periodo de 1 KS/s. En el segundo bloque se muestra la comparación de la corriente entregada a la red de cada panel.

Figura 17 Voltaje y corriente de cada panel

En la parte derecha de la pestaña “Gráfica de salida de los Paneles” se encuentra la *Figura 18*. Este gráfico es uno de los más importantes de la interfaz y del objetivo del proyecto, en este visualizador se podrá ver la potencia generada por cada panel minuto a minuto desde las 6 am hasta las 6 pm. Aquí se podrá observar la eficiencia de un tipo de panel respecto al otro cada minuto durante el día, además cuenta en la parte superior izquierda con una paleta para escoger los rangos de valores de tiempo o de potencia a visualizar.

Figura 18 Potencia diaria de cada panel.

La información de los gráficos de las Figuras 17 y 18, pueden ser fácilmente exportadas a Excel o como imagen ubicando el puntero del mouse sobre la gráfica y oprimiendo el clic derecho del mouse, se desplegara el menú de la *Figura 19*.

Figura 19 Menú despegable para las graficas

En este menú podrá escoger como desea guardar la información de la gráfica, si se desea obtener la información de los datos del esquema en función del tiempo, o si se quiere realizar una impresión del visualizador en un archivo de tipo imagen.

Estos datos que se exportan en esta grafica trabajan de forma independiente a la base de datos que maneja el software para guardar la información diaria de los paneles, donde cada día se creará un archivo nuevo de Excel para visualizar los datos diarios del sistema MPUNAB.

3.2.3 IMPORTAR DATOS DE MICROSOFT EXCEL

La pestaña “Importar datos de Microsoft Excel” es la pestaña que maneja la base de datos de la interfaz. En esta área se puede seleccionar el tiempo de muestreo en el que se guardaran los datos en Excel además se puede escoger los datos de un día determinado dentro de la base de datos del sistema y visualizar la información en una tabla en donde se indica el tipo de dato y su magnitud. Todo esto se puede realizar en la parte izquierda de esta pestaña. A la derecha se pueden graficar los datos que se muestran en la tabla y seleccionar que variable graficar.

En la *Figura 20*. Se ve la parte izquierda de la última pestaña de la interfaz en esta área se exportan los datos almacenados en la base de datos, la carpeta donde se

guardan los datos está configurado predeterminadamente para que sea en el disco local C, allí se creara automáticamente la carpeta de base de datos para cada panel “Datos Panel Estático” y “Datos Seguidor Solar”, diariamente se generara un archivo de Excel con 1440 datos generados cada minuto durante el día, el nombre del documento está configurado como “Tipo de panel_año-mes-día_hora”, ejemplo: Estatico_16-05-19_1537. En esta área también se encuentra el botón de control de tiempo de muestreo en minutos.

Figura 20 Tabla de base de datos.

La *Figura 21*. Es la última gráfica y es la etapa de visualización de resultados, en este punto la base de datos ya tiene información suficiente para generar graficas durante toda una jornada, este visualizador es el más completo de toda la interfaz, con el pad que se encuentra en la parte superior se escoge la variable a graficar, después de escogerla se pulsa el botón recargar para enviar la información a la gráfica, luego de tener los datos en el visualizador, cuenta con un cursor para determinar el valor exacto de la magnitud seleccionada a determinado minuto durante el día.

Figura 21 Visualizador de variables.

3.3 EFICIENCIA ENTRE LOS PANELES

La evaluación de la eficiencia está centralizada en la ubicación geográfica donde se encuentre el panel, en muchos países que se encuentran sobre el sistema ecuatorial de coordenadas, la eficiencia no supera el 30% en los mejores casos debido a que el sol mantiene una un movimiento casi lineal con el eje ecuatorial de

la tierra, para esto hay herramientas de simulación y software que pueden medir la potencia generada por los módulos como PVsyst.

3.3.1 SIMULACIÓN CON SOFTWARE PVSYST

En el software PVsyst se pueden diseñar redes domésticas o industriales de paneles solares, con esta aplicación se tiene una base de datos suministrada por la NASA, que determina muchas características climáticas de cualquier zona del mundo, velocidad del viento, radiación solar, luminosidad y demás, todas estas variables representan cálculos energéticos para una red de módulos solares.

En las siguientes graficas se simuló exactamente el sistema implementado en el laboratorio de energías renovables, el mismo panel solar con sus especificaciones y su inversor. Para el caso del panel ubicado en la universidad se escogió un panel poli cristalinos de 250W con un micro inversor bifásico de 225 W, y a este sistema se le acopla la estructura del seguidor con los limites mecánicos que presenta de 60 a 150 grados, y con la ubicación respecto al sol de la estructura.

El objetivo de simular estos paneles es que podemos adquirir información simulada sobre la eficiencia real entre un panel estático y un seguidor solar. La versión de prueba de este software se puede descargar gratis¹⁸, sin embargo la universidad está en proceso de obtener la licencia del programa.

Las Figuras 22 y 23 muestran un comportamiento lógico de la potencia generada por los dos tipos de paneles, el tiempo de levantamiento de la potencia a su pico máximo en el panel solar estático es más lento, esto significa que gran parte de la radiación directa del sol no la está recibiendo el panel, por tanto su producción de energía es mucho más lenta.

Figura 22 Energía reinyectada vs Hora (Panel Estático)

En el módulo seguidor pasa todo lo contrario, debido al movimiento del panel, la irradiación directa del sol está sobre toda la superficie del panel desde el amanecer.

Figura 23 Energía Reinyectada a red, Plano Acimut vs Hora (Seguidor Solar)

La diferencia de producción energética entre el seguidor solar y el estático es de 276 Wh/d, este resultado ya incluye el suministro al sistema de control del seguidor solar, como conclusión en simulación se espera obtener cerca de un 20% más de energía con el seguidor solar.

3.3.2 THE ENERGY DETECTIVE (TED)

El laboratorio de energías renovables de la UNAB cuenta con un sistema para monitoreo de la potencia entregada por los paneles solares, este sistema cuenta con cuatro pinzas amperimétricas para censar la corriente y cuatro entradas de voltaje, para poder realizar mediciones de potencia en redes de 220V.

Se realizó un monitoreo continuo durante cinco días para comparar la energía producida por el panel seguidor solar y el panel estático, los datos obtenidos tienen muchas perturbaciones como nubes y en algunos casos lluvias *Figura 24*,

esto no permite visualizar de forma correcta la curva de generación de energía durante el día.

Figura 24 Potencia generada Seguidor TED-MPUNAB vs Hora

La *Figura 24*. Es el resultado del monitoreo del día 9 de junio de 2016, desde las 11:30 a.m. hasta las 6 p.m., durante esta jornada hubo muchas nubes pequeñas que influyeron negativamente la producción de energía de los paneles, esta información es la comparación y validación del sistema desarrollado MPUNAB, con un sistema de monitoreo en el mercado TED. Se observa un comportamiento homologado entre los dos sistemas, actuando ante las perturbaciones de igual forma y con magnitudes muy similares.

En la *Figura 25* del día 16 de mayo de 2016, desde las 7 a.m. hasta las 5 p.m., se presentaron muchas nubes pequeñas y de 10 de la mañana a 2 de la tarde 3 nubes grandes que afectaron dramáticamente la producción de energía de los paneles, sin embargo la radiación difusa que se entregaba al panel seguidor solar siempre fue mayor que la del estático.

Figura 25 Generación Potencia Activa Seguidor-Estático vs Hora

En la *Figura 26* se aprecia la curva de eficiencia generada con la ecuación 8 del panel seguidor solar respecto al estático tomada con el TED, el promedio de eficiencia del seguidor durante el día es de 78.74%, donde la potencia promedio del panel estático es de 65 W y el promedio del seguidor es de 100 W. el registro

promedio de eficiencia es elevado debido a que a determinadas horas del día el seguidor solar está generando una cantidad de energía mientras que el estático se encuentra apagado.

(15)

Figura 26 Eficiencia panel seguidor % vs Muestras

3.3.3 SISTEMA DE MONITOREO DE PANELES SOLARES MPUNAB

En el sistema creado para el proyecto se pueden ver todas las componentes de la potencia entregada por el inversor, potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia y frecuencia, gracias a esto se puede analizar el tipo cargas que se están aplicando a la red, y la potencia real que está suministrando el panel.

Para el caso de la Figura 27. Se encuentran los datos del día 09 de junio del 2016, en este día se encontraron muchas perturbaciones muchas nubes pequeñas a lo largo de jornada, pero de igual forma como se registró en el TED el panel seguidor solar sigue recibiendo mayor magnitud de potencia generando un 25,83% más de energía que el estático.

Figura 27 Potencia Activa Panel Seguidor-Estático vs Hora 1

Para el caso de la Figura 28. Se encuentran los datos del día 15 de junio del 2016, en este día se encontraron muchas perturbaciones muchas nubes pequeñas a lo largo de jornada, el panel seguidor solar sigue recibiendo mayor magnitud de potencia generando un 33,97% más de energía que el estático.

Figura 28 Potencia Activa Panel Seguidor-Estático vs Hora 2

Para el caso de la Figura 29. Se encuentran los datos del día 17 de junio del 2016, en este día se encontraron muchas perturbaciones muchas nubes pequeñas a lo largo de jornada, el panel seguidor solar sigue recibiendo mayor magnitud de potencia generando un 29,7% más de energía que el estático.

Figura 29 Potencia Activa Panel Seguidor-Estático vs Hora 3

Luego de registrar los datos durante el día se importaron estos valores a la interfaz y se observó la eficiencia total en la jornada, como era de esperarse el seguidor solar alcanzó mayores porcentajes de eficiencia en la mañana y en la tarde a medio día alcanzó a estar en valor del 0% debido a que se encontraban exactamente en la misma posición. Figura 30.

Figura 30 Eficiencia del seguidor solar vs Hora

Comparando los dos sistemas de monitoreo se estableció que el panel seguidor solar de un solo eje en Colombia es mucho más efectivo que el panel estático, rondando valores que superan el 19% de eficiencia en el peor de los casos y hasta el 47,84% en el mejor, el motor lineal es de 20 Watts incluso incorporando el sistema seguidor la eficiencia seguiría estando por encima de la del estático, ya que la potencia promedio del panel estático es de 80 watts y la del seguidor es de 120 Watts.

4 CONCLUSIONES

Conseguir la instrumentación adecuada para el proyecto como se tenía planteado es muy costosa (COP 10.000.000), sin embargo se pueden adaptar circuitos análogos para conseguir resultados similares a los conseguidos por los sensores comerciales, lograr visualizar toda la onda de la señal es algo complejo ya que las mediciones por medio de sensores tienen salida RMS de la señal y no todo el espectro completo.

La interfaz del sistema de monitoreo es capaz de realizar iguales o mejores prestaciones que la de los sistemas comerciales, la base de datos esta manejada en Microsoft Excel para el fácil acceso a la información, además la capacidad de representar la forma de onda de las señales del panel y mostrar su desfase la hace única, esto porque en el mercado solo se encuentran sistemas que entregan valores RMS de las señales y los equipos de medición que hay tienen costos superiores a los (COP 4.000.000).

El hardware del sistema está diseñado para corrientes máximas de hasta 1.4 Amper, la corriente máxima que fluye por la fase del inversor es de 0.9 A por eso funciona perfectamente para la instalación del laboratorio, si se desea instalar en otro tipo de panel se debe revisar las características del inversor. Los sensores que se encuentran instalados actualmente están sobredimensionados (0-200A) a la carga que realmente requiere el sistema

La eficiencia demostrada por los dos sistemas de monitoreo concluye que el sistema seguidor solar con su gasto de energía que el motor conlleva sigue siendo más eficiente que el panel estático hasta en un 40%, por este motivo los seguidores solares de un solo eje tienen que ser la primera opción en producción de energía fotovoltaica en Colombia si se desean realizar proyectos como parques solares o instalaciones industriales.

La comparación del sistema comercial y el producto realizado demostró que el sistema funciona idealmente para los requerimientos del laboratorio, con un error

de +/- 4 watts del sistema comercial TED respecto al proyecto finalizado, el manejo de los datos en MPUNAB es uno de sus fuertes a comparación del TED, es un sistema muy didáctico en el que se puede graficar directamente una variable de la base de datos con solo seleccionarla.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Electronico, M. (4 de Septiembre de 2015). Electronica Embajadores. Obtenido de <http://www.electronicaembajadores.com/Productos/Detalle/20/LCTR002/modulo-reloj-tiempo-real---conectar-y-listo>
- [2] Afrin, F. (2013). Instalación de seguidores de doble eje en países subdesarrollados. Bangladesh: Conferencia anual IEEE.
- [3] Abd, N. (2013). Comparación del sistema seguidor de dos ejes vs sistema estático. Malasia: IEEE Xplore.
- [4] Cell, Y. 6. (2012). Yingli Solar. Obtenido de http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf
- [5] Huidobro, J. (2012). Series de Taylor y de Laurent. Obtenido de http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/913/mod_resource/content/1/1C_C11852_0910/Transparencias/Trans_tema6impr.pdf
- [6] Industries, V. (2014). Current Monitoring. Obtenido de <http://www.veris.com/Item/H221.aspx>
- [7] Instruments, N. (2015). Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW. Obtenido de <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [8] Series, P. C. (2015). Blue Line Innovations. Obtenido de <http://www.bluelineinnovations.com/>
- [9] SUNNYBOY. (2014). SAM Solar Technology. Obtenido de http://www.eltec.nl/include/nl/downloads/SB1200_3000-DEN110712W.pdf
- [10] Detective, T. E. (2015). TED. Obtenido de <http://www.theenergydetective.com/>

ANEXOS

ANEXO 1 SEUDOCÓDIGO PARA SEGUIDOR SOLAR

```
// LIBRERIAS
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
#include <math.h>
#include "DualVNH5019MotorShield.h"
```

```
DualVNH5019MotorShield md;
```

```
// Verificacion del motor
```

```
void stopIfFault()
```

```
{
  if (md.getM1Fault())
  {
    Serial.println("M1 fault");
    while(1);
  }
}
```

```
//Variables del controlador
```

```
float en=0.0;
```

```
float en1=0.0;
```

```
float u=0;
```

```
float tiempo=0;
```

```
// Variables para filtro
```

```
float PV_n1=0.0;
```

```
float PV_n2=0.0;
```

```
float PVf_n1=0.0;
```

```
float PVf_n2=0.0;
```

```
float PVf=0;
```



```
RTC_DS1307 rtc;// Variable del RTC
```

```
//Dias del mes
```

```
int Year;
```

```
int Mes;
```

```
int Dia;
```

```
float Hora;
```

```
float Minutos;
```

```
float Segundos;
```

```
float ang_control;
```

```
float Pv; // Variable del proceso
```

```
float U;// Accion de control
```

```
int Sp; // Setpoint
```

```
void setup(){
```

```
  Serial.begin(115200);
```

```
  analogReference(INTERNAL);
```

```
  md.init();// Encender puente-H
```

```
  //configuracion de Reloj
```

```
  #ifdef AVR
```

```
    Wire.begin();
```

```
  #else
```

```
    Wire1.begin(); // Shield I2C pins connect to alt I2C bus on Arduino Due
```

```
  #endif
```

```
  ///CONFIGURACION DEL RELOJ/////7
```

```
  rtc.begin();
```

```
  if (! rtc.isrunning() ) {
```

```
    Serial.println("El RTC no esta funcionando !");
```

```
  }
```

```
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Configurar el RTC con la hora y fecha del  
  computador
```

```
}
```

```
void loop()
```

```

{
// Obtener la hora y fecha del DS1307
DateTime t= rtc.now();
Year=t.year();
Mes=t.month();
Dia=t.day();
Hora=t.hour();
Minutos=t.minute();
Segundos=t.second();
tiempo = Hora + Minutos/60;

/////////////////////////////////CONTROLADOR/////////////////////////////////
///// Realizar seguimiento del sol entre 6 am y 6 pm /////
/////////Entrar en estado de Reposo de 6 pm y 6 am //////////
/////////////////////////////////

if (Hora>=6&&Hora<=17){
float Valor_SP= 12*tiempo -35.85; // ECUACION PARA POSICION DEL SOL (ANGULO)
float PV_Pot= analogRead(A1)*1.1/1023; // LECTURA DE POTENCIOMETRO EN VOLTAJE
float PV= (231.95*PV_Pot) + 34.03; // ECUACION PARA POSICION DEL PANEL
(ANGULO)
float PVf=0.002554*PV+0.005109*PV_n1+0.002554*PV_n2+ 1.852*PVf_n1-0.8622*PVf_n2; //
FILTRO PV

// Limitar valor de punto de consigna
if (Valor_SP>150){
Valor_SP=150;
}
if (Valor_SP<60){
Valor_SP=60;
}

// Controlador
float en=Valor_SP-PVf; // ERROR
int Kp=2.5; // GANANCIA PROPORCIONAL

```

```

int Kd=0.5;          // GANANCIA DERIVATIVA
float u= Kp*en+Kd*(en-en1); // ACCION DE CONTROL

// Limitar accion de control
if (u>100){
    u=100;          // SATURADOR DE MAXIMO % DE PWM
}
if (u<-100){
    u=-100;        // SATURADOR DE MAXIMO % DE PWM
}
//Cerca a cero accion de control cero
if (u<10){
    if (u>-10){
        u=0;        // ACCION DE CONTROL 0 , DEBIDO A ZONA MUERTA DEL MOTOR 10%
    }
}

// Envio de Accion de Control al Pololu
int Uc=u*4; // PUENTE H RECIBE VALORES ENTRE -400 y 400
md.setM1Speed(Uc); // ENVIO DE VALOR A PUENTE H
stopIfFault(); // DETENER MOTOR SI ALGO FALLA

// Actualizar valores anteriores
en1=en;
PV_n2=PV_n1;
PV_n1=PV;
PVf_n2=PVf_n1;
PVf_n1=PVf;

// Enviar al Serial
Serial.print("SP= ");
Serial.print(Valor_SP);
Serial.print(" ");
Serial.print("PV= ");
Serial.print(PV);
Serial.print("PVf= ");

```

```

Serial.print(PVf);
Serial.print(" ");
Serial.print("U= ");
Serial.print(u);
Serial.print(" ");
Serial.print(t.year(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(t.day(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(t.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(t.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.println(t.second(), DEC);
}
if (Hora<6||Hora>17){
float Valor_SP= 115; // CONDICION PARA ESTADO DE REPOSO

float PV_Pot= analogRead(A1)*1.1/1023; // LECTURA DE POTENCIOMETRO EN VOLTAJE
float PV= (231.95*PV_Pot) + 34.03; // ECUACION PARA POSICION DEL PANEL
(ANGULO)
float PVf=0.002554*PV+0.005109*PV_n1+0.002554*PV_n2+ 1.852*PVf_n1-0.8622*PVf_n2; //
FILTRO PV

// Controlador
float en=Valor_SP-PVf; // ERROR
int Kp=2.5; // GANANCIA PROPORCIONAL
int Kd=0.5; // GANANCIA DERIVATIVA
float u= Kp*en+Kd*(en-en1); // ACCION DE CONTROL

// Limitar accion de control
if (u>100){
u=100; // SATURADOR DE MAXIMO % DE PWM

```

```

}
if (u<-100){
    u=-100;    // SATURADOR DE MAXIMO % DE PWM
}
//Cerca a cero accion de control cero
if (u<10){
    if (u>-10){
        u=0;    // ACCION DE CONTROL 0 , DEBIDO A ZONA MUERTA DEL MOTOR 10%
    }
}

// Envio de Accion de Control al Pololu
int Uc=u*4; // PUENTE H RECIBE VALORES ENTRE -400 y 400
md.setM1Speed(Uc); // ENVIO DE VALOR A PUENTE H
stopIfFault(); // DETENER MOTOR SI ALGO FALLA

// Actualizar valores anteriores
en1=en;
PV_n2=PV_n1;
PV_n1=PV;
PVf_n2=PVf_n1;
PVf_n1=PVf;

// Enviar al Serial
Serial.print("SP= ");
Serial.print(Valor_SP);
Serial.print(" ");
Serial.print("PV= ");
Serial.print(PV);
Serial.print("PVf= ");
Serial.print(PVf);
Serial.print(" ");
Serial.print("U= ");
Serial.print(u);
Serial.print(" ");
Serial.print(t.year(), DEC);

```

```
Serial.print('/');  
Serial.print(t.month(), DEC);  
Serial.print('/');  
Serial.print(t.day(), DEC);  
Serial.print(' ');  
Serial.print(t.hour(), DEC);  
Serial.print(':');  
Serial.print(t.minute(), DEC);  
Serial.print(':');  
Serial.println(t.second(), DEC);  
}  
}
```

ANEXO 2 DATASHEET PANEL SOLAR

ANEXO 3 DATASHEET INVERSOR

6.4

ANEXO 4 DATASHEET SENSOR SCT-013-030

ANEXO 5 REGISTRO GRAFICO DE LA POTENCIA DE LOS PANELES

PANELES				%
Seguidor		Estático		Eficiencia del panel Seguidor Respecto al estático
Fecha	Potencia W	Fecha	Potencia W	
15/06/2016	54,43	15/06/2016	37,79	44,04
16/06/2016	93,37	16/06/2016	70,00	33,40
17/06/2016	73,42	17/06/2016	50,14	46,42
18/06/2016	44,21	18/06/2016	29,91	47,84
22/06/2016	57,03	22/06/2016	40,61	40,43
23/06/2016	59,77	23/06/2016	47,65	25,43
24/06/2016	53,41	24/06/2016	41,82	27,70
08/07/2016	67,45	08/07/2016	49,78	35,51
09/07/2016	75,71	09/07/2016	63,25	19,70
15/07/2016	59,96	15/07/2016	43,61	37,49
16/07/2016	31,85	16/07/2016	21,80	46,10

Porcentaje de Eficiencia Diaria Seguidor

