

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA CAPTURA Y MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA Y CURVA CARACTERÍSTICA I-V EN TIEMPO REAL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZANDO LABVIEW® Y ARDUINO**

**DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM TO MEASURE THE EFFICIENCY AND CHARACTERISTIC CURVE I-V IN REAL TIME OF A SOLAR PV SYSTEM USING LABVIEW® AND ARDUINO**

**Juan Pablo Vargas B. y Gonzalo Navia A.**

*Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)*

*Universidad Privada Boliviana*

*jpvargas@upb.edu*

(Recibido el 19 de mayo 2015, aceptado para publicación el 25 de junio 2015)

## RESUMEN

En el presente artículo se presenta un sistema de control para la visualización en tiempo real de datos experimentales de la curva de eficiencia y de la curva característica I-V (corriente versus voltaje) de un panel fotovoltaico (FV) SUNTECH-STP030-12. El sistema está compuesto de un programa desarrollado en LabView® y un circuito electrónico de captura y procesamiento de datos. Se utilizó un microprocesador Arduino UNO R3 para la interface entre los datos del panel FV y el programa en LabView®. Los resultados muestran que es posible utilizar microprocesadores de bajo costo con suficiente capacidad de procesamiento en tiempo real de la información obtenida de los paneles FV.

## ABSTRACT

In this article we present a control system for real time visualization of experimental data of the efficiency and I-V (current vs. voltage) charts of a SUNTECH-STP30-12 photovoltaic (PV) panel. The system consists of a LabView® program and an electronic circuit to capture and process data of the PV panel. An Arduino UNO R3 microprocessor was used as an interface between the PV panel data and the LabView® program. The results show that it is possible to use low-cost microprocessors, with enough capacity to process information of PV panels in real time.

**Palabras Clave:** Paneles Fotovoltaicos, Arduino, LabView®, Sistemas de Control.

**Keywords:** PV Panels, Arduino, LabView®, Control Systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Bolivia, que cuenta con un recurso solar abundante con promedios anuales entre 3 a 5 kWh/m<sup>2</sup>.día de energía solar disponible como menciona Energética [1], se están empezando a implementar proyectos con sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en zonas rurales y en regiones donde no se tiene acceso a electrificación o como alternativa en vez de utilizar combustibles fósiles según el estudio de Energética [1], Gonzáles [2], y Fernández [3]. El gobierno de Bolivia además tiene como perspectiva que en el 2020 el 4% de la generación de energía eléctrica provenga de energías limpias y renovables mencionados en los informes de Torres [4] y VEEA [5].

Uno de los problemas que se tiene en los sistemas fotovoltaicos instalados en Bolivia es la falta de medición de la eficiencia del sistema, de la capacidad de energía eléctrica generada por día y de la energía consumida, entre otros factores, que no permiten determinar si realmente estos sistemas son rentables desde el punto de vista técnico y económico. Por otra parte, tener un sistema de control y de medición del sistema fotovoltaico deriva en un aumento en el costo de inversión significativo que en muchos casos no resulta atractivo para el inversionista.

En una primera etapa, se desarrolló un sistema y metodología de medición de la curva característica de un panel fotovoltaico utilizando un microprocesador Arduino UNO R3 [6] que permite obtener en tiempo real mediciones de voltaje y corriente del panel, pero no así de la radiación solar disponible, la cual se debía medir por separado con otra interfaz para poder evaluar la eficiencia del panel.

En este proyecto, se muestra el desarrollo de un sistema de control de medición de eficiencia y curva característica I-V de un panel fotovoltaico en tiempo real utilizando una sola interfaz, además de ofrecer la visualización de las curvas y de los parámetros del sistema donde el usuario puede observar los resultados sin necesidad de utilizar herramientas adicionales (otra interfaz y/o programa). Para tal efecto se utilizó LabView® como herramienta computacional para el desarrollo del programa de obtención de datos, visualización y cálculo de la eficiencia y curva característica del panel fotovoltaico utilizando como una sola interfaz el microprocesador Arduino UNO R3 y un circuito electrónico propio [7] y [8].

## 2. MARCO TEÓRICO

Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (energía solar fotovoltaica). El parámetro estandarizado para obtener la potencia máxima que el módulo puede entregar es bajo una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> a 25 °C. La energía producida por los paneles solares es de corriente continua, y para conectar a un sistema independiente es necesario un regulador de carga y a una batería. La eficiencia típica de un panel fotovoltaico está entre 10 y 20% [9], [10], [11], [12].

Para datos de la simulación y posterior comparación, se utilizó el panel fotovoltaico SUNTECH-STP030-12. La hoja de especificaciones técnicas del fabricante y el panel fotovoltaico se muestra en la Figura 1 y la Figura 2, respectivamente. La potencia máxima es 30 W y la eficiencia teórica es 10,4%.

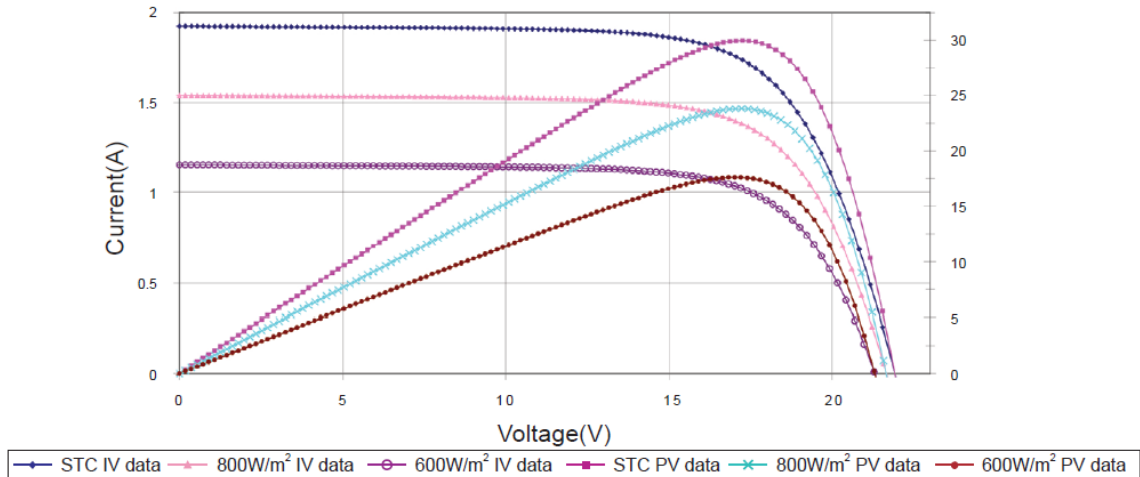
Electrical data		Dimensions	
Nominal output P <sub>mpp</sub> :	30 [W]	Length:	426 [mm]
Max. power tolerance:	+/- 10 [%]	Breadth:	680 [mm]
Max. Voltage system:	715 [V]	Height:	18 [mm]
Nominal Voltage U <sub>mpp</sub> :	17,2 [V]	Height, incl. junction box:	18 [mm]
Nominal current I <sub>mpp</sub> :	1,74 [A]	Weight:	3,2 [kg]
Open circuit voltage U <sub>oc</sub> :	21,6 [V]	Junction:	Kabel
Short circuit current I <sub>sc</sub> :	1,94 [A]		
Temperature coefficient of open circuit Voltage U <sub>oc</sub> :	-75 [mV / °C]	Cells	
Temperature coefficient of short circuit current:	0,055 [% / °C]	Number of cells per module:	36
Temperature coefficient Output:	-0,47 [% / °C]	Cell technology:	polycrystalline
Cell conversion efficiency:	k.A.	Cell form:	k.A.
Module conversion efficiency:	10,4 [%]	Cell size:	156 x 39 [mm]
Certificates:	IEC 61215 Schutzklasse II CE-Konformität	Cell contacting:	k.A.

Figura 1- Hoja de datos técnicos del panel SUNTECH-STP030-12.



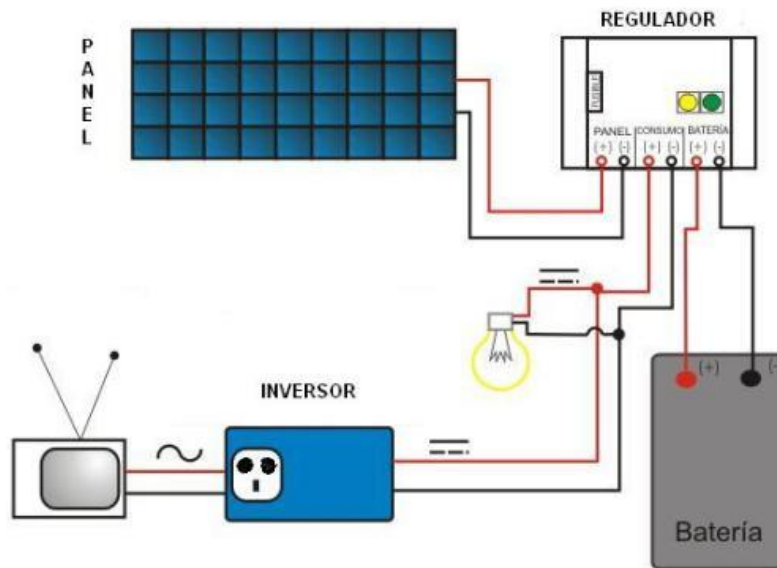
Figura 2 - Panel Fotovoltaico SUNTECH-STP030-12.

La Figura 3 muestra las curvas I-V y de potencia para diferentes intensidades de sol en las cuales trabaja teóricamente el panel fotovoltaico.



**Figura 3** - Curva característica I-V del panel fotovoltaico presentada por el fabricante.

La Figura 4 muestra la instalación típica de un sistema fotovoltaico compuesto del panel, regulador de carga, batería, inversor y cargas eléctricas. El regulador de carga, regula el voltaje del panel a un voltaje constante de 12 VDC que son enviados a la batería donde se almacena la energía eléctrica, las cargas eléctricas pueden ser de 12 VDC ó 220 VAC al colocar un inversor.



**Figura 4** - Esquema básico de un sistema fotovoltaico.

La representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la curva característica de corriente-tensión I-V, Figura 5. La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo ciertas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). Los valores de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajará, vendrá determinado por la carga a la que esté conectado [13], [14].

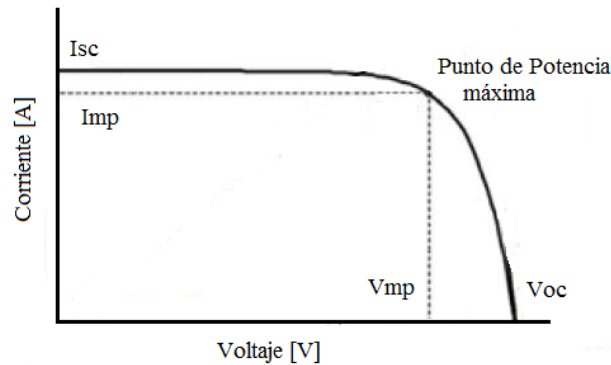


Figura 5 - Curva característica de un panel fotovoltaico, con sus principales elementos.

### 2.1 Programa de visualización LabView®

LabView® tiene un entorno de programación G (gráfico), que facilita el trabajo de programación gracias a la disponibilidad de bloques prediseñados [7]. De igual modo, tiene subelementos como es el Mathscript que permite el uso del lenguaje Matlab para facilitar aún más la programación. LabView® tiene desarrollados subrutinas que permiten conectarse con el puerto serial del Arduino UNO R3, facilitando el envío y la obtención de datos de y a sus puertos.

### 2.2 Microprocesador Arduino Uno R3

El Arduino Uno es una placa electrónica basada en el microprocesador Atmega328, Figura 6. Cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un *header* ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar al microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB, o alimentarlo con un adaptador o batería como se menciona en el Manual Arduino [8]. En la Figura 6 se muestra el Arduino Uno R3.



Figura 6 - Placa Arduino Uno R3 presentada por el fabricante.

### 2.3 Parámetros de la característica I-V

Los parámetros de la curva característica de corriente-tensión I-V son:

- **Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ):** Es la máxima corriente que produce el panel bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.
- **Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** Es el máximo voltaje del panel bajo condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.
- **Potencia máxima ( $P_{max}$ ):** Es la máxima potencia que produce el panel en condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V.
- **Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ ):** Es el valor de la corriente para  $P_{max}$ .
- **Voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ ):** Es el valor de voltaje para  $P_{max}$ .
- **Factor de forma ( $FF$ ):** Es el valor correspondiente al cociente entre  $P_{max}$  y el producto de  $I_{sc}$  por  $V_{oc}$ . Proporciona una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1)$$

#### 2.4 Ecuaciones características de la curva I-V

Finalmente, la curva característica “corriente-tensión” de una celda fotovoltaica, puede describirse por la ecuación:

$$I = I_{ph} - I_o \left[ e^{\left( \frac{V+IR_s}{\alpha} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

Ante el desconocimiento de varios parámetros de la ecuación característica I-V (2), ésta también puede expresarse igualmente por la ecuación (3) que cuenta con todos los parámetros conocidos:

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_o \left[ e^{\left( \frac{\frac{V}{N_s} + I \times R_s}{\alpha \times A} \right)} - 1 \right] \quad (3)$$

El valor de la resistencia en serie del panel fotovoltaico  $R_s$  es muy próximo a cero, por tanto, si se igual  $R_s = 0$ , la ecuación (3) puede ser reformulada por la ecuación (4) que se presenta a continuación:

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_o \left[ e^{\left( \frac{\frac{V}{N_s}}{\alpha \times A} \right)} - 1 \right] \quad (4)$$

donde  $\alpha$  es el voltaje térmico,  $N_p$  el número de celdas en paralelo. (Brindado por el fabricante),  $N_s$  es el número de celdas en serie. (Brindado por el fabricante),  $A$  es la constante de idealidad del diodo (varía entre diodos: 1.03; 1.3; 1.6),  $I_o$  es la corriente de saturación del diodo e  $I_{ph}$  es la corriente fotogenerada, que puede obtenerse por la ecuación (5).

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_i \times \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (5)$$

En la ecuación (5),  $I_{ph,n} \approx I_{sc}$ ,  $K_i$  es la temperatura de la corriente co-eficiente (%/°C),  $G$  la irradiación actual del Sol ( $W/m^2$ ),  $G_n$  la irradiación nominal ( $1000 W/m^2$ ) y  $\Delta T$  la variación de la temperatura en Kelvin ( $T-T_n$ ) donde  $T_n = 25$  °C

El voltaje térmico  $\alpha$  está dado por la ecuación (6),

$$\alpha = \frac{KT}{q} \quad (6)$$

donde  $K$  es la constante de Boltzmann =  $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K,  $q$  la carga de un electrón =  $1.607 \times 10^{-19}$  C y  $T$  la temperatura actual de la celda en Kelvin,  $I$  y  $V$  son la corriente y voltaje en el sistema

La corriente de saturación del diodo  $I_o$  está dada por la ecuación (7):

$$I_o = I_{rr} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{AK} \times \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (7)$$

con  $T$  temperatura de la celda en Kelvin,  $T_n$  temperatura nominal de la celda en Kelvin (298),  $E_g$  constante de banda prohibida del silicio (1.12) e  $I_{rr}$  es la corriente de saturación inversa cuya fórmula es la siguiente [11], [12], [13], [14], [15]:

$$I_{rr} = \frac{I_{sc}}{\left( e^{\frac{V_{oc}}{A \times N_s \times \alpha}} - 1 \right)} \quad (8)$$

#### 2.5 Potencia de un panel fotovoltaico

La forma de calcular la potencia que de una panel fotovoltaico es multiplicando el valor de la tensión por el valor de la intensidad de la corriente que se genera en el panel fotovoltaico. Para realizar ese cálculo matemático se utiliza la siguiente fórmula (9):

$$P = V \times I \tag{9}$$

donde  $P$  es la potencia del panel fotovoltaico (W),  $V$  voltaje del panel fotovoltaico (V) e  $I$  corriente del panel fotovoltaico (A).

### 2.6 Eficiencia de un panel fotovoltaico

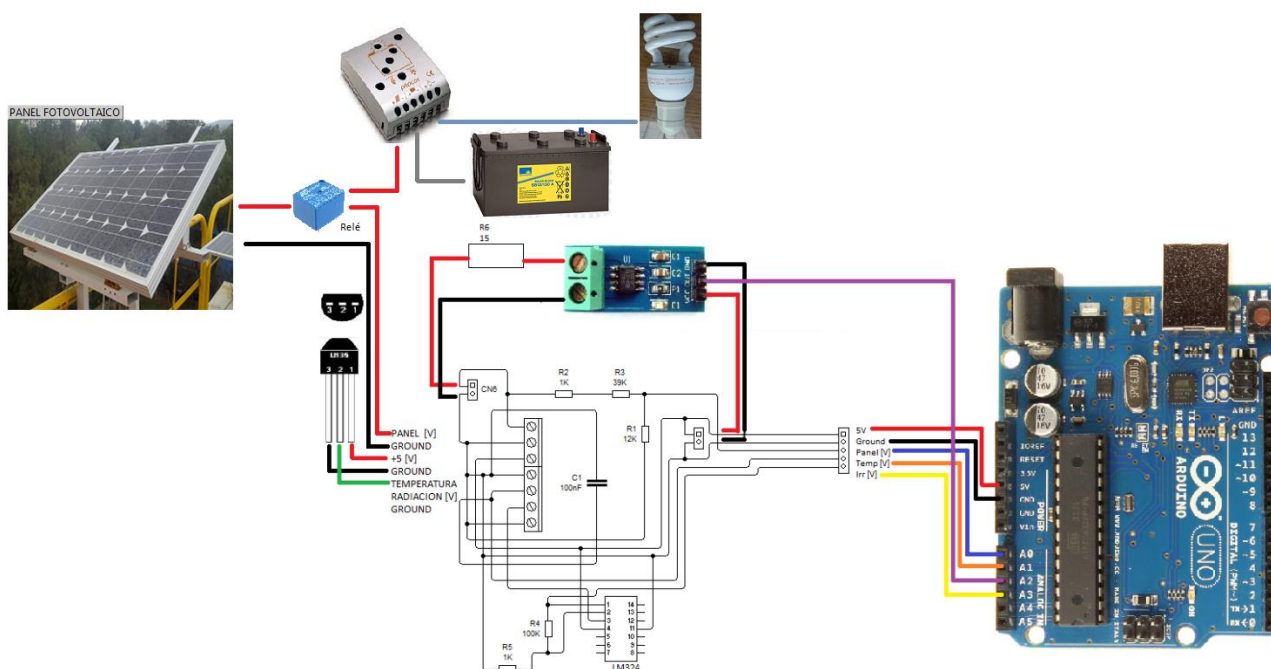
La eficiencia del panel fotovoltaico, es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la energía solar total absorbida por el panel. Este término se calcula usando la ecuación (10):

$$\eta = \frac{P}{G \times A} \tag{10}$$

donde  $P$  es la potencia del panel fotovoltaico (W),  $G$  la irradiación actual del sol ( $W/m^2$ ) y  $A$  el área del panel fotovoltaico ( $m^2$ ).

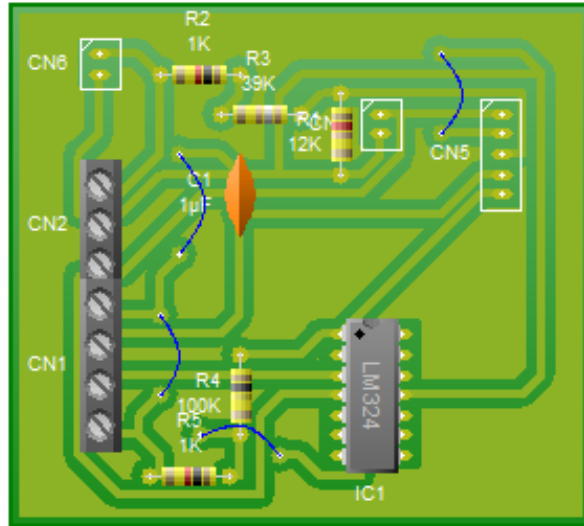
### 3. ESQUEMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DE CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La Figura 7 muestra el esquema del circuito eléctrico que se debe instalar para obtener los datos de voltaje, corriente, radiación, entre otros, y la conexión que se debe realizar del sistema fotovoltaico con el sensor de corriente, sensor de temperatura, el piranómetro y su intercomunicación con los puertos analógicos de la placa Arduino.

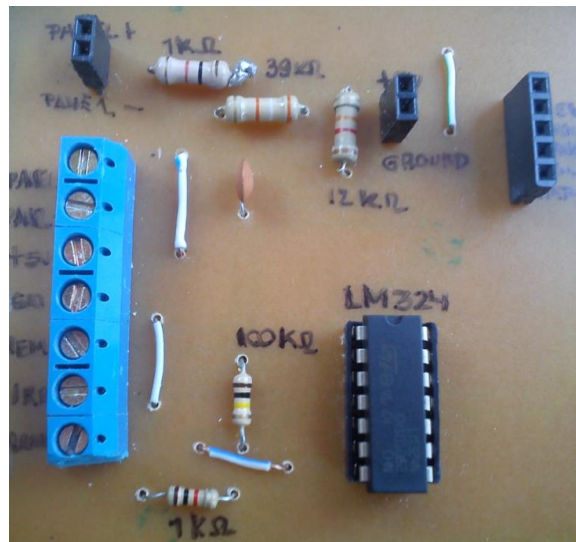


**Figura 7** - Circuito de conexión del sistema de automatización.

En las Figuras 8 y 9 se muestra la placa electrónica impresa e implementada, respectivamente, donde se tiene los sócalos de conexión para el panel fotovoltaico, la alimentación del sensor de corriente, la alimentación al sensor de temperatura (en paralelo a un capacitor para disminuir la atenuación) y de igual forma para conectar el piranómetro. Se encuentra presente el divisor de tensión para el voltaje del panel fotovoltaico y el amplificador operacional para aumentar la tensión del piranómetro.



**Figura 8** - Placa de impresión del circuito de automatización digitalizada.



**Figura 9** - Placa del circuito de automatización implementada.

El sistema electrónico de captura de datos funciona de la siguiente manera: el Arduino captura los datos requeridos mandando una señal al relé que envía la energía del panel fotovoltaico de las cargas requeridas a los sensores de medición por un corto periodo de tiempo necesario para obtener las mediciones, una vez obtenidos los datos el Arduino manda la señal para que el relé cambie de posición y envíe la energía del panel fotovoltaico al sistema de cargas instalado. Posteriormente, los datos son enviados al programa LabView® donde los valores son procesados para la visualización de los resultados en tiempo real.

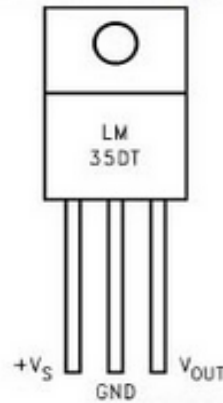
### 3.1. Equipos e instrumentos utilizados

En esta sección se presentan los equipos e instrumentos utilizados para la obtención de datos del panel fotovoltaico requeridos para evaluar la eficiencia y curva característica I-V.

#### 3.1.1 Sensor LM35

El LM35, Figura 10, es un sensor de temperatura integrado, cuya tensión de salida es linealmente proporcional a temperatura en °C (grados centígrados). El LM35 por lo tanto tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura lineal calibrada en grados Kelvin: que el usuario no está obligado a restar una gran tensión constante para obtener grados centígrados. El LM35 no requiere ninguna calibración externa o ajuste para proporcionar una precisión típica de  $\pm 1.4$  °C. El voltaje de salida es convertido a temperatura por la siguiente ecuación (11):

$$\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = V_{out} \times 100 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{V}} \right) \quad (11)$$

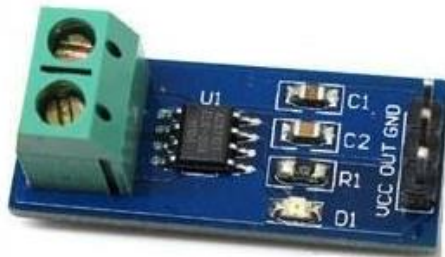


**Figura 10** - Esquema del Sensor LM35.

### 3.1.2 Sensor de corriente allegro ACS712TELC 30A +- 30A

El ACS712 es un sensor de efecto de Hall muy preciso, Figura 11, lineal de bajo offset, con una pista de conducción de cobre localizada cerca de la pastilla de silicio de un sensor de efecto Hall. La corriente aplicada a través de esta pista de cobre induce un campo magnético el cual es capturado por el sensor de efecto de Hall y convertido en un voltaje proporcional de manera lineal. La exactitud y linealidad es optimizada por medio de la localización próxima de la señal de corriente al sensor, su voltaje de operación está en el rango de 3.3v a 5v. La ecuación manejada por este sensor es la siguiente (12):

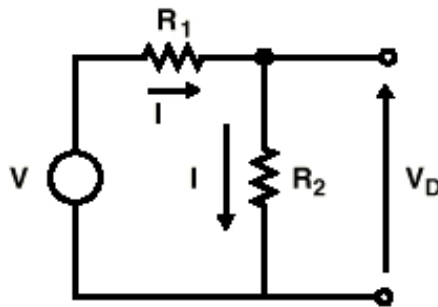
$$V_{out} = 0.066 \times i + V_{offset} \quad (12)$$



**Figura 11** - Sensor de corriente allegro ACS712TELC 30A +- 30A.

### 3.1.3 Divisor de voltaje

Como su nombre lo menciona permite adecuar una tensión a valores deseados, se usan frecuentemente en el diseño de circuitos porque son útiles para generar un voltaje de referencia para la polarización de los circuitos activos. En la Figura 12 se muestra un esquema simple de divisor de tensión.



**Figura 12** - Circuito divisor de tensión.

Aplicando las leyes de Kirchhoff se obtiene siguiente ecuación:



$$Vd = V \times \left( \frac{R2}{R1+R2} \right) \quad (13)$$

### 3.1.4 Piranómetro

El piranómetro, Figura 13, es un instrumento meteorológico utilizado para medir la radiación solar incidente sobre la Tierra (vatios por metro cuadrado), expresando su salida en mV según la intensidad del Sol. En este caso, se tiene un rango de 1 (mV/m<sup>2</sup>) a 15.78 (mV/ m<sup>2</sup>), donde el máximo voltaje representa la radiación solar de 1000 (W/ m<sup>2</sup>). Para el programa se utiliza la siguiente relación:

$$G = V \times \frac{1000}{15.87} \quad (14)$$

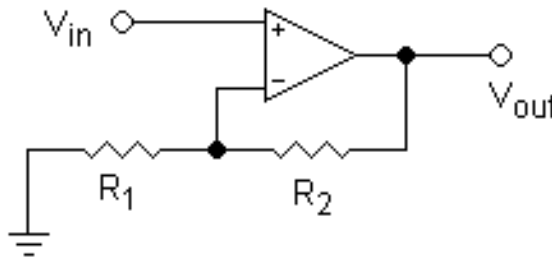
donde  $G$  irradiación actual del sol (W/m<sup>2</sup>) y  $V$  tensión de salida del piranómetro (mV/m<sup>2</sup>).



**Figura 13** - Piranómetro utilizado para la medición de radiación solar.

### 3.1.5 Amplificador de Tensión

El amplificador de tensión permite la amplificación de voltaje, Figura 14. La tensión de entrada se aplica al pin positivo. Para calcular la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada se usa un pequeño divisor de tensión.



**Figura 14** - Circuito amplificador no inversor.

La relación del amplificador operacional no inversor está dada por la ecuación siguiente:

$$Vout = Vin \times \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) \quad (15)$$

### 3.1.6 Relé

El relé es un dispositivo que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico que a través de una bobina y un electroimán, se acciona un interruptor que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes, Figura 15.

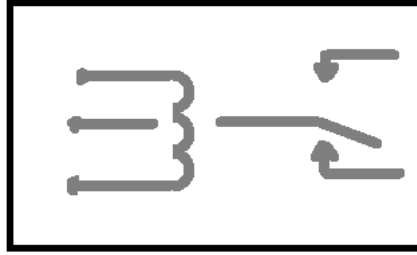


Figura 15 - Esquema de un relé mecánico.

### 3.2 Medición de la tensión del panel fotovoltaico

El voltaje máximo permitido en el ingreso de los pines analógicos en la placa electrónica Arduino Uno R3, es de 5 voltios, pero el voltaje máximo que puede llegar según los datos técnicos del panel fotovoltaico (Figura 1) es de aproximadamente 22 (Volts). En base a ello, se emplea la ecuación (13), donde  $R_2$  toma un valor de una resistencia comercial, en este caso 12 K $\Omega$ :

$$V_d = V \times \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow 5 = 22 \times \left( \frac{12000}{R_1 + 12000} \right) \Rightarrow R_1 = 40800 \approx 40 \text{ K}\Omega$$

Por tanto, la ecuación para determinar el valor real del panel en el Arduino está dada por la ecuación (16):

$$V = V_d \times 4.33 \quad (16)$$

Debido a las atenuaciones generadas por el Arduino en la captura de datos, se ajusta el factor de compensación de 4.33 a 5.82, este valor se obtiene tomando muestras y promediando el valor medido con un multímetro con el valor medido entre la interfaz Labview y Arduino. Esto es causado principalmente porque se tiene un solo lector analógico, es decir que no se puede leer todos los puertos al mismo tiempo.

### 3.2 Medición de corriente del Panel Fotovoltaico

Para la medición de la corriente que se genera en el panel fotovoltaico se utiliza la ecuación (12), donde es necesario hacer una conexión en serie al panel fotovoltaico (acompañado de resistencias de protección de alta potencia), consecuentemente, debido a que no está conectado a ninguna carga se obtiene el valor de la corriente en cortocircuito del panel en volts. De manera experimental se determinó que el voltaje de offset (0 Amperios) es equivalente a 2.49 [V]. La ecuación para obtener el valor de la corriente en la placa del Arduino es:

$$i = \frac{V_{out} - 2.49}{0.066} \quad (17)$$

### 3.3 Medición de temperatura del Panel Fotovoltaico

Para obtener la temperatura en el panel fotovoltaico, se posiciona el sensor LM35 junto al panel fotovoltaico, previamente se debe hacer la conexión de la alimentación y la salida de la temperatura a la placa electrónica Arduino, empleando la ecuación (11) para obtener la temperatura actual en grados centígrados, se recomienda conectar un capacitor para compensar la atenuación y evitar la interferencia del ruido en la medición de los datos de temperatura.

### 3.5 Medición de irradiación incidente sobre el Panel Fotovoltaico

El piranómetro es un dispositivo de alta precisión que convierte la radiación solar en voltaje por unidad de área en el rango de 1 (mV/m<sup>2</sup>) a 15.78 (mV/ m<sup>2</sup>), estos voltajes de salida del dispositivo son niveles demasiado bajos para que la placa de Arduino los detecte. Mediante el uso de un amplificador operacional (LM324) y en base a la ecuación (6), se amplifica la señal para que el voltaje sea detectado por el Arduino. Luego se predefine el valor de las resistencias R1 y R2 por valores disponibles comercialmente de 1 K $\Omega$  y 100 K $\Omega$  respectivamente donde se obtiene:

$$V_{out} = V_{in} \times (101) \quad (18)$$

Reemplazando la ecuación (18) en la ecuación (14) se tiene:

$$G = \frac{V_{out}}{101} \times \frac{1000}{0.01587} \quad (19)$$

La ecuación anterior (19) representa el valor de la radiación solar  $G$  ( $W/m^2$ ) en la placa electrónica en Arduino.

#### 4. DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LABVIEW®

Para el desarrollo del programa en LabView®, primeramente, se realizó el enlace entre el programa y el Arduino para poder reconocer los puertos de entrada y salida de datos desde LabView®, Figura 16.

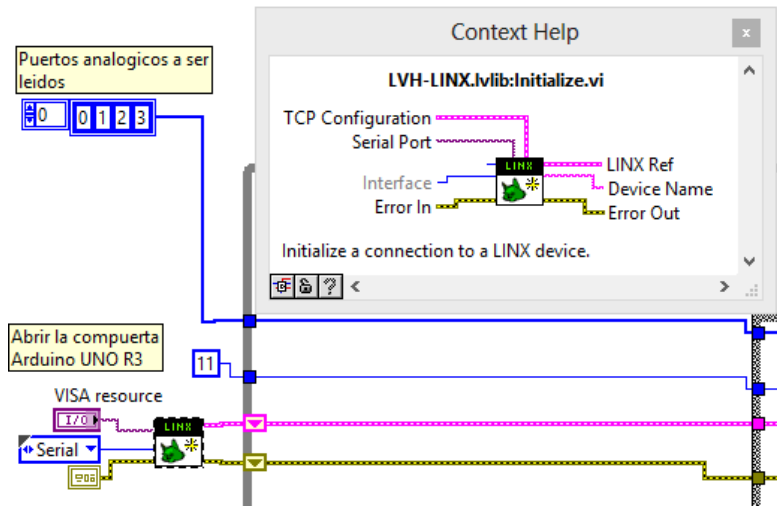


Figura 16 - Interface LabView – LHV LINX para el reconocimiento de los datos del Arduino.

Instalada la interface LabView – Arduino, se utiliza un subprograma que lea los valores especificados del Arduino (Analog Read) y otro que realice las acciones programadas con los datos obtenidos (Set Duty Cycle). La Figura 17 muestra los subprogramas utilizados para obtener y procesar los datos obtenidos del Arduino. Posteriormente, se introduce las ecuaciones en MathScript para evaluar la eficiencia y curva característica I-V del panel fotovoltaico.

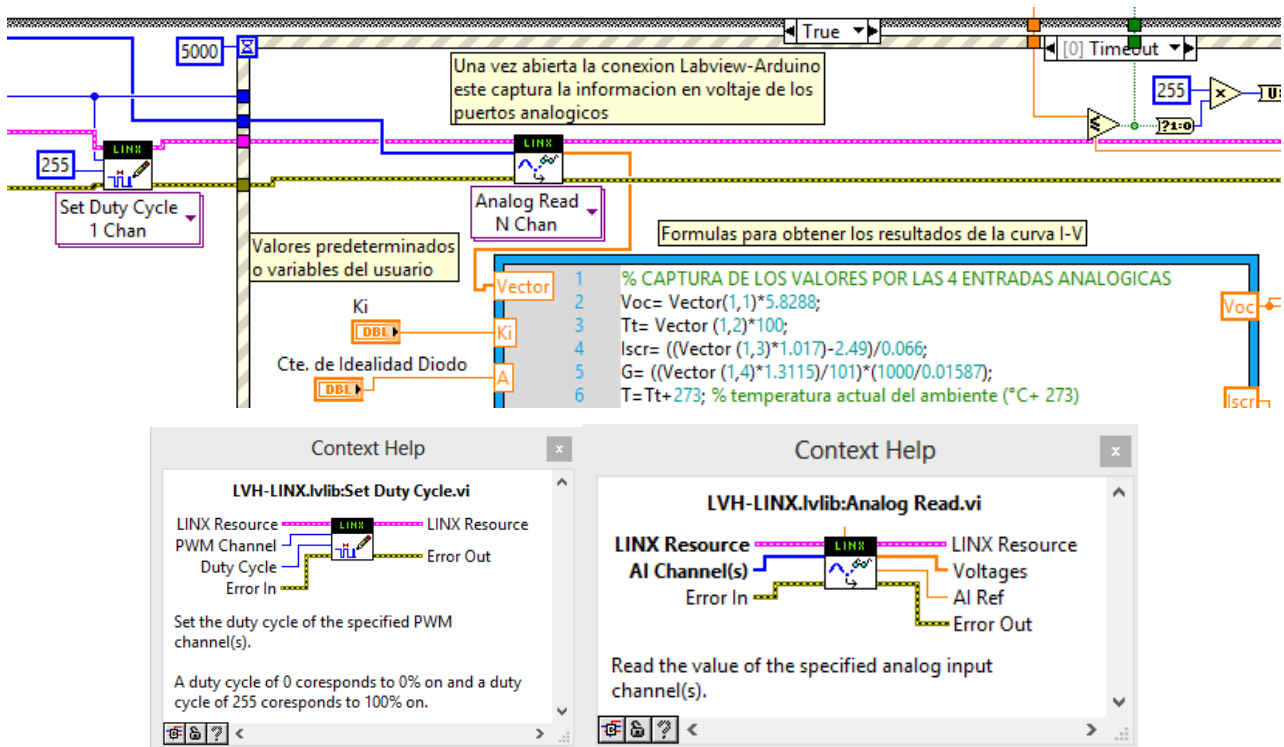


Figura 17 - Subprogramas utilizados para la adquisición y procesamiento de datos en LabView®.

Para la visualización de los datos y resultados, se utilizó la opción de diagrama en LabView, donde se asignó las variables que serán constantes y las variables que serán obtenidas por los sensores y serán enviados a LabView a través del Arduino. Luego, se determinó una variable para el intervalo de tiempo para la toma y procesamiento de datos. Se utilizó gráficas para mostrar los resultados en tiempo real (ver las Figuras 18 y 19).

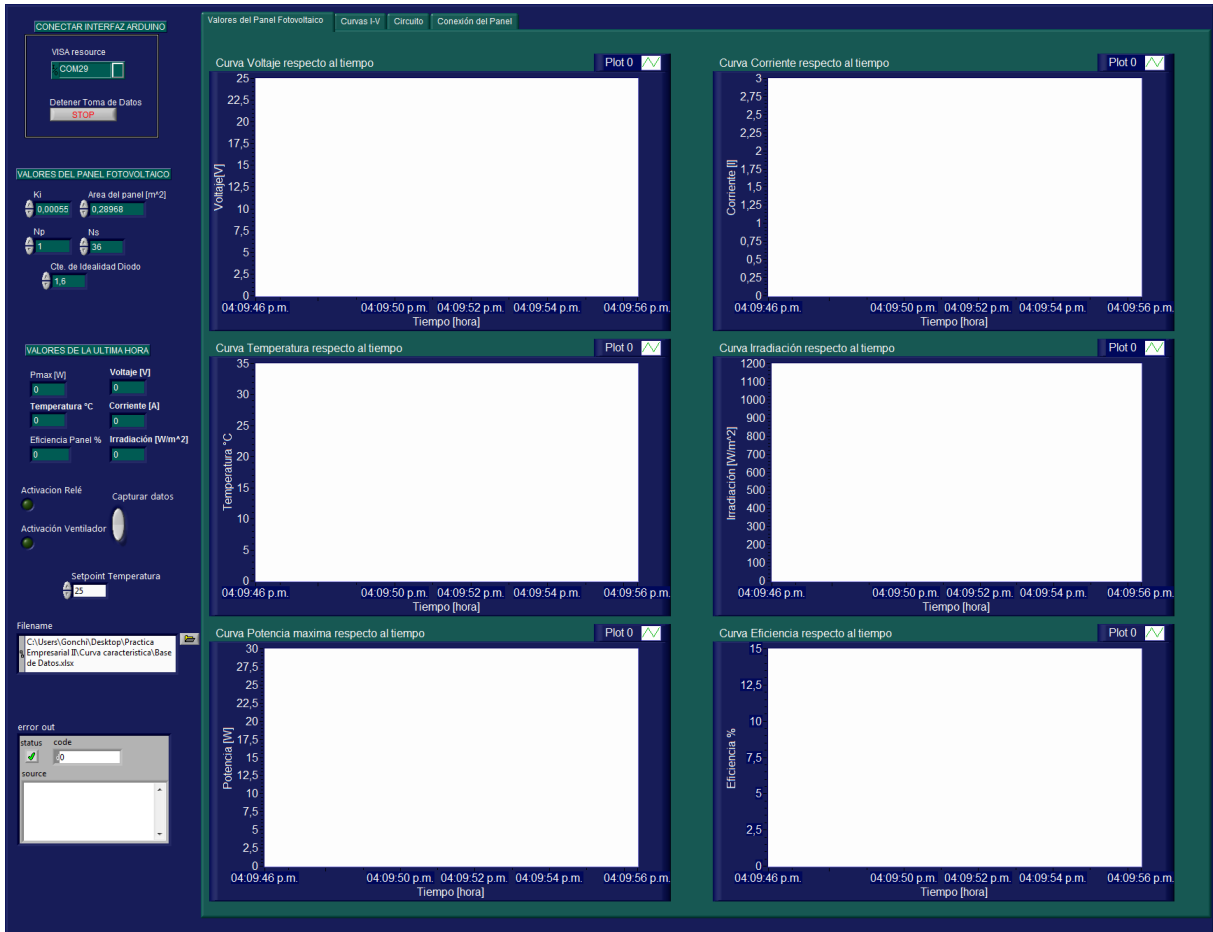


Figura 18 - Panel frontal del programa realizado en LabView ® presentado al usuario.

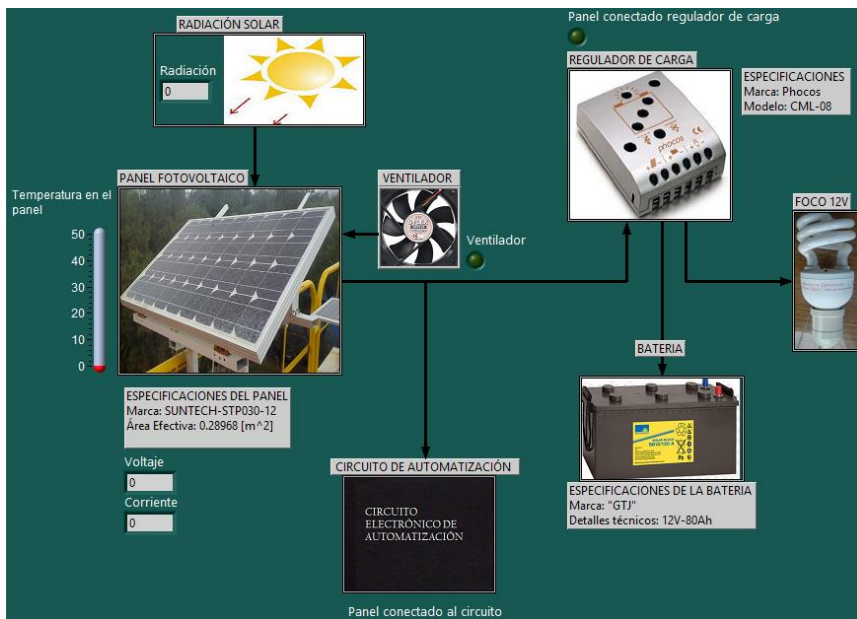


Figura 19 - Visualización de los datos y resultados obtenidos en LabView del sistema fotovoltaico.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

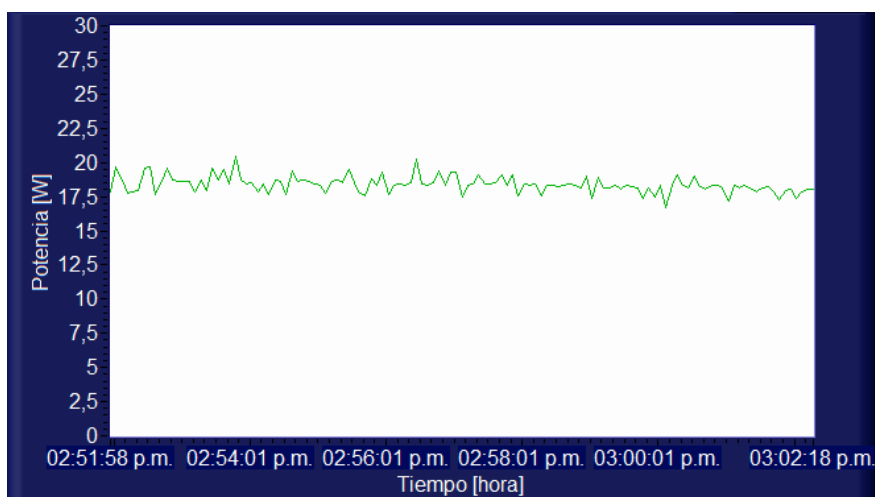
A continuación se presentan los resultados obtenidos por el programa desarrollado en LabView®. Los datos experimentales fueron tomados en junio de 2014 en Cochabamba. Los datos fueron obtenidos y procesados en un intervalo de un minuto.

La Figura 20 muestra la curva I-V y la relación voltaje y potencia obtenida de los datos experimentales del panel fotovoltaico. Se puede constatar que una gran similitud entre la curva I-V con la curva que proporciona el fabricante (ver la Figura 3), la diferencia se debe a factores como la falta de información por parte del fabricante de algunos parámetros en la ecuación para la obtención de la curva, como es el caso de la resistencia en serie ( $R_s$ ), la idealidad del diodo ( $A$ ) y la constante de la banda prohibida de silicio ( $E_g$ ), estos últimos dos parámetros varían entre cada panel. En este caso, la resistencia en serie fue despreciada y para los otros dos parámetros, se consideraron los valores ideales ( $A=1.6$ ;  $E_g=1.12$ ). Se debe mencionar que otro factor importante en la variación de la curva I-V es la vida útil del panel fotovoltaico, en este caso el panel tiene 7 años de funcionamiento y es natural su degradación.

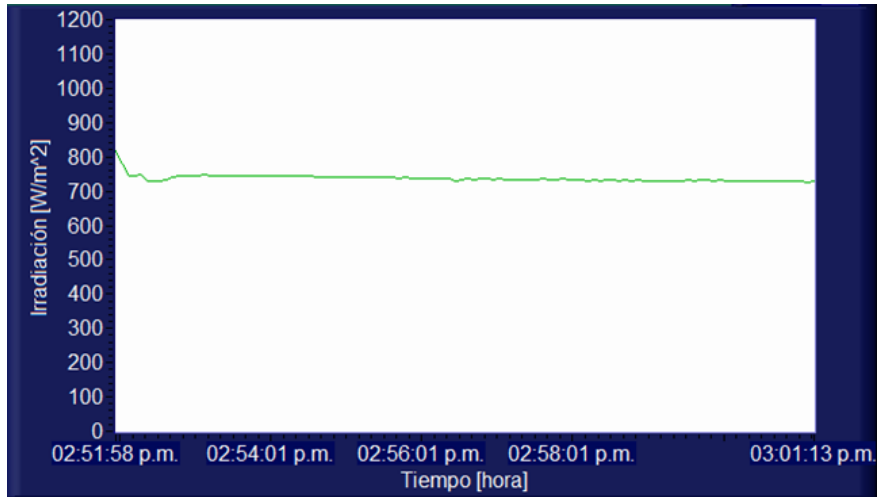


**Figura 20** - Curva I-V (derecha) y relación de voltaje respecto a la potencia obtenida del panel fotovoltaico a una radiación solar de  $750 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

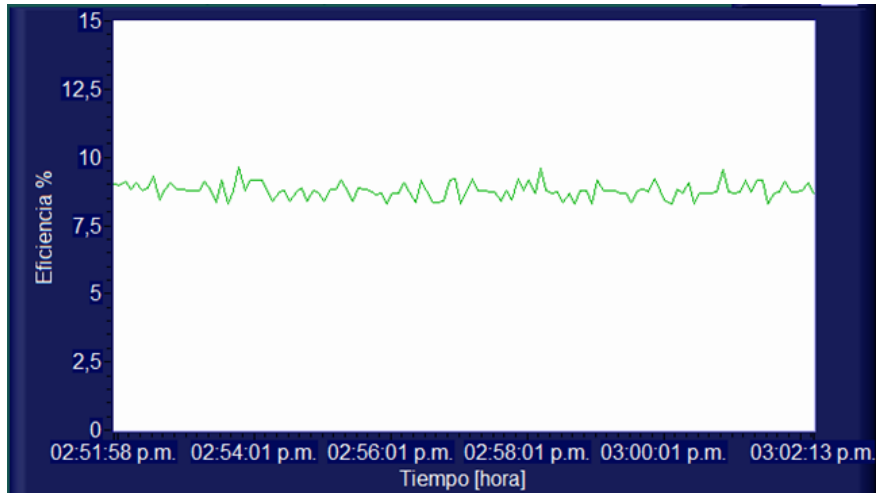
La Figura 21 muestra la potencia eléctrica obtenida en el panel fotovoltaico donde se observa que para el periodo de medición (12 minutos) la potencia eléctrica promedio fue de  $17.5 \text{ W}$  a una radiación solar promedio medida de  $750 \text{ W/m}^2$  (ver Figura 22). Considerando el área del panel fotovoltaico (Figura 1) y la ecuación de la eficiencia (10), la Figura 23 muestra los datos de la eficiencia del panel fotovoltaico en tiempo real donde se obtuvo un valor promedio de 8% de eficiencia, un 20% menos que la eficiencia teórica dada por el fabricante, esto se debe a que el fabricante consideró solo el área de las celdas fotovoltaicas ( $0.219 \text{ m}^2$ ) y no el área del panel. Modificando el valor del área en la ecuación de la eficiencia, se tiene una eficiencia de 10.35% igual a la eficiencia teórica.



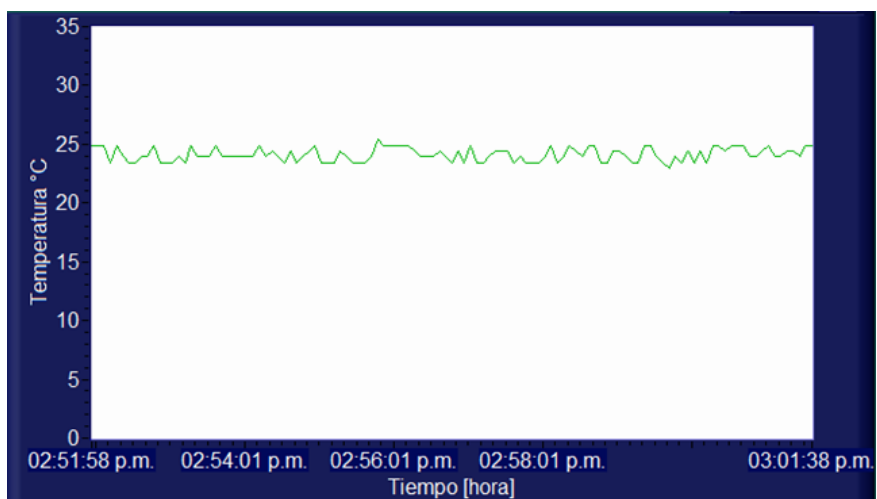
**Figura 21** - Potencia del panel fotovoltaico en función del tiempo.



**Figura 22** - Radiación indicante sobre la Tierra en función del tiempo.



**Figura 23** - Eficiencia del fotovoltaico en función del tiempo.



**Figura 24** - Temperatura ambiente donde se encontraba el panel fotovoltaico en función del tiempo.

Como se mostró en la Figura 19, el sistema Scada permite la visualización de los datos y resultados del panel fotovoltaico en tiempo real haciendo más claro y sencillo el manejo y manipulación de datos.

La Figura 24 muestra los datos de la temperatura obtenida por el sistema electrónico diseñado, con este sensor se puede controlar el funcionamiento de otros equipos como es el caso del ventilador que actúa en función del valor de la temperatura designada, de igual manera se puede mandar otro tipo de señales de acuerdo a diferentes requerimientos y aplicaciones que se tenga.

## 7. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de control y monitoreo de la eficiencia de un panel fotovoltaico utilizando microprocesadores y sensores de medición de bajo costo que permiten obtener datos en tiempo real con una visualización amigable y de fácil manejo gracias a la interface con LabView®. Se desarrolló un circuito eléctrico para la captura y el procesamiento de datos. La experiencia realizada permitió observar los puntos críticos para la replicabilidad del proyecto, debido mayormente a las atenuaciones y distorsiones que se tienen en el circuito eléctrico durante la toma de datos. Para corregir estas atenuaciones se hicieron mediciones experimentales con equipos electrónicos (multímetro y amperímetro) para validar los resultados obtenidos por el sistema de control diseñado. Se recomienda utilizar equipos de medición certificado para obtener factores de compensación confiables.

El sistema de control y monitoreo desarrollado es adaptable a todo tipo de panel fotovoltaico, las únicas modificaciones que se requieren son las resistencias del divisor de tensión, o bien reemplazar esto con un potenciómetro de alta precisión. Posteriormente, en el programa se debe cambiar los valores de entrada de acuerdo a las especificaciones técnicas de cada panel fotovoltaico como la constante  $K_i$ , el área del panel, la constante de idealidad del diodo y el número de celdas en serie y paralelo.

De los resultados experimentales obtenidos, se pudo observar que se obtuvo la misma eficiencia del panel descrita por el fabricante de 10.35% considerando el área de las celdas fotovoltaicas. La potencia experimental obtenida fue 17.5 W a una radiación de 750 W/m<sup>2</sup>, comparado con la curva de potencia del fabricante debería ser de 20 W a las mismas condiciones de radiación. Esta disminución en la potencia puede ser debido a factores como el desgaste natural de las celdas, el ángulo de inclinación del panel, la temperatura ambiente del lugar y el tipo de ondas electromagnéticas presentes en la radiación solar de Cochabamba.

La mayor ventaja del sistema desarrollado es la versatilidad de la información obtenida en tiempo real donde no es necesario un post procesamiento de la información ya que se procesa la información en el mismo momento en el que se adquiere los datos. Esto permite obtener una base de datos con información relevante como la eficiencia del sistema y la generación de energía eléctrica real obtenida a lo largo del día o del periodo de operación del panel fotovoltaico, esta base de datos puede ser utilizado para determinar la factibilidad económica real del proyecto, además de ayudar a detectar posibles anomalías en el funcionamiento del sistema. El bajo costo del sistema de control comparado con los sistemas existentes en el mercado permitirá que estos sistemas puedan ser implementados en paneles fotovoltaicos instalados en regiones aisladas ya que el sistema de control puede ser diseñado para enviar datos a través de internet o de mensajería móvil.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Energética- Energía para el desarrollo*. Available: [www.energetica.org.bo/mapasolar/](http://www.energetica.org.bo/mapasolar/). (Acceso Enero 2015)
- [2] J.M. Gonzales. *Energías renovables y eficiencia energética en el estado plurinacional de Bolivia*. Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, 2011.
- [3] M. Fernández. *Rol e impacto socioeconómico de las energías renovables en el área rural de Bolivia*. Serie Investigaciones de la Plataforma Energética N° 5. CEDLA, 2010.
- [4] G. F. Torres. *Perspectiva de la matriz energética boliviana*. Fundación Hanns Siedel. 2011.
- [5] *Plan de universalización Bolivia con energía 2010-2025*. Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, 2010
- [6] T. G. Vargas y A. Abrahamse. "Desarrollo de un trazador de curva I-V de eficiencia, de bajo costo, para paneles fotovoltaicos de silicio." *Revista Investigación & Desarrollo. Universidad Privada Boliviana*, vol. 14, no. 1, pp. 100-116, 2014.
- [7] M. Abdukadir et al. "Modeling and Simulation of a Solar Photovoltaic System Its dynamic and transient characteristics in LABVIEW," *Faculty of Electrical Engineering University Technology Malaysia*, 2013, pp 185-189.
- [8] *Manual Arduino Uno R3*. Available: [www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno](http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno). (Acceso Enero 2015)
- [9] A. McEvoy et al. *Practical Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*. Second Edition. ISBN: 978-0-12-385934-1. Elsevier, 2012.

- [10] M. Moro. *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Paraninfo. ISBN 8497327764, 2010.
- [11] S. N. Rajpritam, "Modeling of photovoltaic array." In *Department of electrical engineering national institute of technology*, 2010, pp. 19-21.
- [12] M. Bibek and P. Bibhu. "Matlab based modeling of photovoltaic array characteristics," in *Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela*, 2012, pp 10-41.
- [13] H. Skiadas. *Advances in data analysis theory and applications to reliability and inference, data mining, bioinformatics, lifetime data, and neural networks*. Birkhäuser Basel, Suiza, 2010.
- [14] *Tecnológica Energética, Formulas de Energía Solar Fotovoltaica*, España: Universidad de Navarra, pp. 28-29. Available: <http://www1.ceit.es/asignaturas/tecener1/FormulasSolarFotovoltaica.pdf> (Acceso Enero 2015)