

**TRAZADOR DE CURVAS I-V DE CÓDIGO ABIERTO PARA MONITOREO DE RENDIMIENTO DE
PANELES FOTOVOLTAICOS EN BOLIVIA**
AN OPEN-SOURCE HARDWARE I-V CURVE TRACER FOR MONITORING PV OUTPUT IN BOLIVIA

Tatiana Vargas y Augusta Abrahamse

Centro de Investigaciones Ópticas – (CIO)

Universidad Privada Boliviana

aabrahamse@gmail.com

(Recibido el 28 de enero 2014, aceptado para publicación el 14 marzo 2014)

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un trazador de curva I-V de código abierto para el monitoreo de potencia producida por un panel solar en Bolivia, y los resultados obtenidos por éste. El dispositivo está elaborado con componentes de bajo costo y es posible adaptar su diseño para monitorear paneles de diferentes potencias. El dispositivo toma muestras de corriente y voltaje para un elemento fotovoltaico utilizando una carga variable para obtener los diferentes puntos que conforman una curva corriente-voltaje. El dispositivo también tiene un régimen de control, el cual desconecta y reconecta el panel de su carga en intervalos de tiempo fijos para la toma de datos, permitiendo el monitoreo del panel aun cuando está siendo utilizado en un sistema de energía solar.

ABSTRACT

The development of an open-source I-V curve tracer for monitoring PV output in Bolivia and the results are presented. The device is made of low cost elements, and it is possible to adapt the design in order to monitor PV devices with different power outputs. Using a variable load, the I-V curve tracer samples the current and voltage for numerous points along the current-voltage curve of the PV panel. The device utilizes a control regime that automatically connects and disconnects the solar panel from a load at fixed time intervals to take the I-V curve measurements. This enables the device to be used for extended monitoring even when the panel is in normal use as part of a PV system.

Palabras Clave: Curva I-V, Panel Fotovoltaico, Monitoreo de Rendimiento, Energía Solar, Energía Renovable, Código Abierto.

Keywords: I-V Curve, Photovoltaic, PV Output Monitoring, Solar Energy, Renewable Energy, Open Source.

1. INTRODUCCIÓN

Bolivia tiene un amplio recurso solar. Se encuentra en los trópicos, donde la época de lluvias ocurre en el verano y las horas de sol pico por día son relativamente uniformes durante todo el año. En particular, el altiplano del país, donde se encuentra aproximadamente el 35% de la población, recibe un promedio superior a 6 horas del sol pico diario durante casi 9 meses del año, y por su elevación gran parte de la radiación es radiación directa.

Según el Instituto Nacional de Estadística [1] en el censo más reciente, actualmente el 88% de la población en Bolivia tiene acceso a electricidad, sin embargo más del 34% de familias en el área rural todavía no cuenta con este servicio básico. A pesar de que el gobierno está avanzando en la expansión de la red, muchas poblaciones son tan remotas que los costos de suministro energético por familia son muy elevados y es muy difícil que sean alcanzadas por la red eléctrica [2]. Los sistemas solares de producción de energía, al ser una forma de generación distribuida, son una manera de proveer electricidad sin necesidad de extender la red.

Aunque existe una demanda energética que podría ser satisfecha empleando la energía solar, actualmente este tipo de energía provee un porcentaje mínimo de la generación energética total en Bolivia. Además del alto costo de sistemas fotovoltaicos como factor importante por el cual la energía solar no es más implementada, también existen barreras informacionales. Como sucede en muchos otros países en vías de desarrollo, el recurso solar aún no está bien monitoreado y Bolivia depende de datos satelitales para el conocimiento de este recurso [3], [4], [5],[6]. Nguyen & Pearce [7] sugieren que la resolución gruesa de estos datos no refleja variaciones microclimáticas y por lo tanto no permite la planificación de proyectos a escala de utilidad. En el caso de Chile, ya se ha reconocido esta falta de información como un factor por el cual los sistemas de concentradores solares no han sido implementados [8].

La falta de monitoreo de radiación solar es solamente un síntoma de un problema más grande – la baja capacidad de investigación en general en países en vías de desarrollo. Un abrumador porcentaje de la investigación científica se realiza en el hemisferio norte, priorizando el enfoque para los mismos países que dirigen las investigaciones. En el caso de la medicina, por ejemplo, se emplea menos del 1% de la inversión para investigar enfermedades tropicales que

afectan al 90% de la población mundial. Al igual que con la mayoría de la investigación dedicada al medio ambiente [9] [10], éste es el caso de la energía solar. La gran mayoría del trabajo de investigación realizado para el diseño de sistemas hasta la optimización de materiales fotovoltaicos se lleva a cabo en el hemisferio norte. Se hacen pruebas rutinarias de paneles solares y son optimizados con respecto al espectro AM 1.5 (ASTM G173 AM1.5), específicamente fabricados para reflejar las características del espectro solar del cielo claro en medio de latitudes y altitudes cerca al nivel del mar. Estas características espectrales corresponden a muchos lugares de Europa y Estados Unidos [11].

El monitoreo de sistemas a largo plazo ha sido una iniciativa de investigación casi exclusivamente de países de Norte América y Europa. Se han diseñado e instalado Campos de Medición en Exterior para monitorear el rendimiento de los sistemas bajo condiciones de operación a largo plazo. Ejemplos destacables son las instalaciones de NREL y Sandia Labs que han realizado pruebas a largo plazo de paneles solares desde hace más de 35 años, indica National Renewable Energy Laboratory [12] en su información. Lugares similares son escasos y distantes entre sí en países en desarrollo, y no se conoce la existencia de campos de medición en exterior en Bolivia para evaluar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos. Esta falta de investigación en energía solar en Bolivia y otros países en desarrollo, resultan en sistemas cuyo rendimiento es poco entendido y probablemente no trabajan de manera eficiente. Por otra parte, los paneles solares son generalmente fabricados en el hemisferio norte, bajo condiciones solares, climáticas y geográficas diferentes a las que se tienen en Bolivia y otros países en desarrollo, además los métodos para dimensionamiento de sistemas y posicionamiento de paneles solares están hechos en base a la radiación e incidencia solar que se recibe en el hemisferio norte.

Una de las principales barreras para la investigación científica en los países en desarrollo es la falta de instrumentación e instalaciones. En el caso de la energía solar, los instrumentos de monitoreo comercial son caros y generalmente están fuera del límite del presupuesto de los científicos locales. El hardware de código abierto puede proporcionar una solución a la necesidad de equipamiento para los investigadores de energía solar en Bolivia y otros países en desarrollo. De forma similar al movimiento de software de código abierto, la filosofía detrás del hardware de código abierto [13], es posible gracias a los diseñadores que dan información como esquemas, componentes, costos de material y disposición de circuitos, de forma gratuita, y los usuarios y otros diseñadores pueden realizar modificaciones y mejoras sobre el diseño original. El hardware de código abierto se está empleando para muchos elementos que van desde microprocesadores [14], hasta redes de sensores inalámbricas [15], y una variedad de diferentes equipos de laboratorio, [16]. Por otra parte, muchos citan y promueven el potencial del código abierto para poder ser utilizados en países en desarrollo tanto en la creación de tecnología sostenible [17] o para la investigación de enfermedades tropicales [18].

Sugerir el uso de hardware de código abierto es un pequeño paso en una solución para proveer equipos para la investigación de radiación solar para los países en desarrollo y una forma de crecer en el campo de la investigación. Esto es necesario porque aunque los paneles solares tengan especificaciones de fábrica, se conoce también que estos valores pueden variar de acuerdo a factores como suciedad, sombra, incidencia solar, radiación solar, espectro solar, posición geográfica, temperatura ambiente, temperatura del panel y otros, que no se toman en cuenta al realizar las pruebas en fábrica en condiciones ideales, que raramente son similares a las condiciones reales bajo las cuales funciona un panel. Para poder conocer cuánta potencia genera un panel bajo condiciones reales, se requiere un dispositivo que indique los valores obtenidos agrupándolos en curvas corriente-voltaje que describen el rendimiento. Al conocer el rendimiento de un panel es posible ajustar los modelos existentes e incluso crear nuevos modelos para el cálculo de potencia diaria entregada por un panel que puedan ser usados con las condiciones que presenta Bolivia y obtener el mayor provecho de la energía solar.

Se presenta el desarrollo de un trazador de curva I-V de código abierto para el monitoreo de paneles solares. En un campo de medición en exterior, un componente importante es un instrumento que permita medir la potencia de un panel en el tiempo. El método más completo para lograr esto, es obtener la curva I-V de un panel, porque permite rastrear el rango completo de combinaciones de corriente y voltaje producidas por un elemento fotovoltaico en un espacio de tiempo dado. Los trazadores de curva I-V comerciales tienen un valor de aproximadamente \$us. 20,000, pero aquí se presenta un dispositivo de código abierto, es decir, el diseño de hardware es de distribución libre, que se puede construir por un costo total de \$us. 65. En el espíritu de código abierto, donde el principio es compartir, modificar y mejorar diseños públicamente distribuidos para usos propios, se adaptó un diseño de código abierto propuesto por Alderman [19], y se está compartiendo este diseño libremente en http://www.appropedia.org/I-V_Curve_tracer.

El diseño compartido por Alderman sirvió como base para el dispositivo presentado en este documento, que además cuenta con la capacidad de poder permanecer conectado a una carga dentro del sistema de energía (una batería o controlador de carga) y al mismo tiempo medir la curva I-V del panel, desconectando al panel momentáneamente de su carga en intervalos fijos de tiempo. En Bolivia esta característica presenta una gran ventaja ya que muchos de los sistemas de energía solar implementados se encuentran en el área rural y ninguno cuenta con un sistema de monitoreo. Con este dispositivo como base, modificando el almacenamiento de datos, es posible implementarlo con elementos fáciles de adquirir, para áreas rurales del país y también en el área urbana porque no se cuenta con un sistema

automatizado de medición de rendimiento de paneles solares.

Adicionalmente, el dispositivo emplea un microcontrolador Arduino UNO R3. Arduino es un microcontrolador de código abierto con un interfaz de programación fácil de utilizar, y rápidamente se está convirtiendo en un referente importante en el movimiento de hardware de código abierto [20], [21], ya que permite crear y modificar prototipos sin necesidad de hacer grandes cambios en el hardware seleccionado y además tiene un precio no muy elevado, tomando en cuenta las interfaces con las que cuenta.

2. MONITOREO DE PANEL FOTOVOLTAICO CON UN TRAZADOR I-V

Para el monitoreo de un panel solar, es necesario medir su eficiencia. La manera más completa de lograr este fin es a través de la medición de la curva I-V del panel solar, porque la curva característica I-V de un elemento fotovoltaico representa todos los posibles puntos de operación de corriente y voltaje, y como se mencionó anteriormente, la curva I-V varía según las condiciones ambientales y también el estado del mismo panel.

Al graficar el voltaje en función de corriente, se obtiene una curva, en esta curva se puede observar que cuando el voltaje es cero, la corriente está en su máximo valor (no existe diferencia de potencial), en cambio cuando el voltaje es máximo, la corriente es igual a cero (no existe flujo de electrones), estos valores se denominan corriente de cortocircuito (I_{SC}) y voltaje de circuito abierto (V_{OC}), respectivamente. La corriente de corto circuito varía con relación a la radiación del sol y el área de las celdas; el voltaje de circuito abierto está determinado por las propiedades del material semiconductor, la iluminación y la temperatura, si la temperatura de la celda aumenta, el valor de voltaje de circuito abierto disminuye [22]. Entre los puntos de la curva también se encuentra el punto de máxima potencia (MPP), que es el máximo valor resultante del producto entre la corriente y el voltaje, como se ve en la ecuación (1), donde I_{mp} es la corriente en el máximo punto de potencia y V_{mp} el voltaje en este punto y P_{mp} es la potencia máxima entregada por el dispositivo.

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp} \quad (1)$$

Al compararlo con el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito se puede determinar el rendimiento del panel monitoreado.

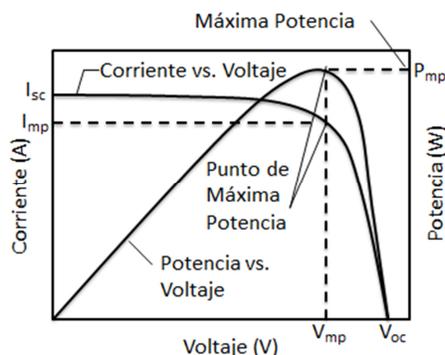


Figura 1 - Curva de productos corriente-voltaje y curva I-V.

El área rectangular bajo la curva en el punto de máxima potencia que se observa en la Figura 1, se denomina Factor de Relleno (FF). Este valor expresa cuán eficiente es un panel, si el factor de relleno se encuentra próximo a los valores de V_{OC} e I_{SC} , es más eficiente que cuando está alejado de estos. En la Figura 2 se observa que la curva azul corresponde a un panel fotovoltaico con mayor factor de relleno que el panel con la curva naranjada, y por lo tanto se concluye que el panel con la curva azul es más eficiente.

Con los datos de corriente y voltaje obtenidos por el trazador de curva I-V, es posible calcular la potencia diaria producida por un panel al muestrear curvas a diferentes horas del día y de este modo conocer las horas de sol pico; la potencia diaria es el producto de la potencia máxima del panel (dada por el fabricante) y las horas de sol pico. Este método de estimar la potencia es un método sencillo empleado por la mayor parte de la gente que implementa sistemas fotovoltaicos, que al no contar con datos reales de horas de sol pico, basan su cálculo en promedios mensuales e incluso anuales obtenidos por la NASA. Existen otros métodos además de éste que permiten estimar la potencia, todos ellos teóricos, que podrían ser mejorados si se realizara la comparación con resultados prácticos. Por otro lado, al comparar los factores de relleno de curvas obtenidas en diferentes tiempos, se puede ver como decrece o se mantiene la eficiencia de un determinado panel.

También se puede tener un referente de la irradiación solar con el valor de corriente de corto circuito medido por el

trazador de curva I-V, si se tiene en cuenta la relación mostrada en la ecuación (2), donde $E_s(\lambda)$ es la intensidad de luz en función de la longitud de onda y $SR(\lambda)$ es la respuesta espectral de la celda fotovoltaica como indica Emery [23].

$$I_{SC} = \int_0^{\infty} E_s(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \tag{2}$$

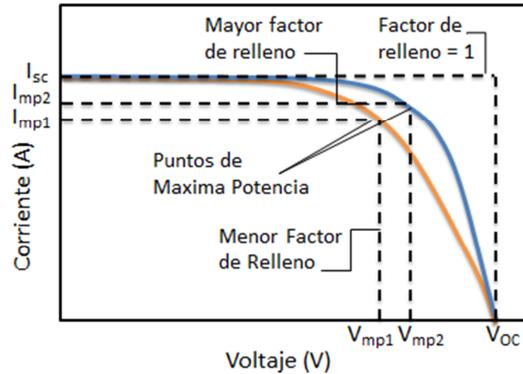


Figura 2 - Factores de relleno a diferentes niveles de potencia.

3. DISEÑO DEL DISPOSITIVO

3.1. Descripción del sistema

A partir del diseño de hardware de código abierto propuesto por Alderman [19], se ha diseñado un trazador de curva I-V automático, que cuenta con un temporizador que lo activa a diferentes horas del día e incluye interruptores que permiten al dispositivo estar conectado a un panel y a la carga del panel (controlador de carga o batería) de modo que el panel bajo prueba sea operacional en el tiempo que no se están obteniendo puntos de la curva. Esto con el fin de poder obtener datos automáticamente en un intervalo de tiempo programable sin necesidad de conectar y desconectar el trazador de curva.

El principio del diseño del trazador I-V es la carga y descarga de una carga capacitiva o inductiva, esto permite al panel solar simular una carga variable, y medir puntos de corriente y voltaje de diferentes niveles. Como se observa en la ecuación (3), la corriente en un capacitor está en función a la variación del voltaje en el tiempo, y su carga también está en función del tiempo de acuerdo a su valor de capacitancia, ecuación (4).

$$I = C \frac{dV}{dt} \tag{3}$$

$$q(t) = CV(t) \tag{4}$$

En la Figura 3 se observa el circuito responsable de cargar y descargar el capacitor: el panel fotovoltaico actúa como una batería en cuanto se cierra $S2$ y comienza a cargar el capacitor $C1$, cuando $C1$ está completamente cargado $S2$ se abre nuevamente y $S3$ se cierra, conectando $C1$ a una resistencia de drenaje, descargándose para ser cargado nuevamente.

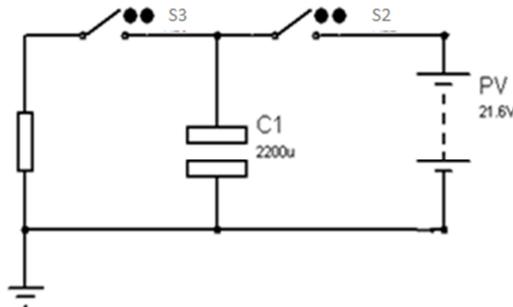


Figura 3 - Diseño del circuito de carga variable.

En la Figura 4 se observa que para cada tiempo de carga, desde que se cierra el interruptor (inicio de carga) hasta que se

ha concluido la carga, existe un punto diferente en la curva.

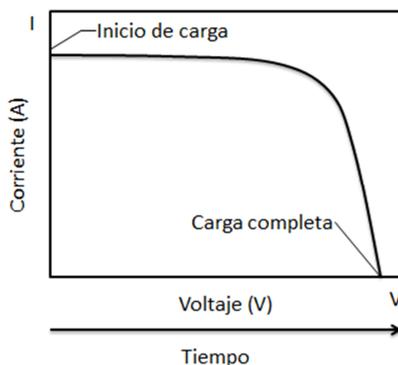


Figura 4 - Puntos de la curva durante la carga.

El Trazador de Curvas I-V está hecho con un microcontrolador Arduino UNO R3, y el diseño está definido para monitorear un panel solar con las características que se muestran en la Tabla N°1, tomando un total de trece curvas por día, de 6 a.m. a 7 p.m. en intervalos de una hora. Cabe aclarar que el diseño puede ser modificado para funcionar con paneles de diferentes características cambiando algunos componentes.

TABLA 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PANEL SUNTECH MODELO STP030-12/LB

I_{MPP}	1.74 A
V_{MPP}	17.2 V
I_{SC}	1.93 A
V_{OC}	21.6 V
T_{NOCT}	50°C

El dispositivo está diseñado para permitir el monitoreo de paneles activos conectados a una carga (batería, controlador de carga o algún otro tipo de carga), por medio de un interruptor que desconecta el panel de su carga y lo conecta al Trazador I-V. Esta función es importante porque permite el monitoreo de un panel aun cuando está siendo utilizado.

En la Figura 3 se observa el esquema general del diseño: S1 es el interruptor que conecta el panel a su carga en A o al Trazador I-V en B. Mientras S1 está conectado a A, el trazador de curvas está totalmente aislado del panel, de modo que el panel puede funcionar sin problema. En cuanto S1 se conecta a B, la carga queda aislada, de modo que no sufre daños al tomar muestras para la curva. Una vez que S1 se conecta a B, el sensor de voltaje mide el voltaje de circuito abierto, posteriormente S2 se cierra y el capacitor C comienza a cargarse, los datos leídos por los sensores de corriente y voltaje se van almacenando hasta que la carga ha sido completada. Una vez que esto ha sucedido, S2 se abre y S3 se cierra para que el capacitor se descargue y esté preparado para una nueva toma de datos.

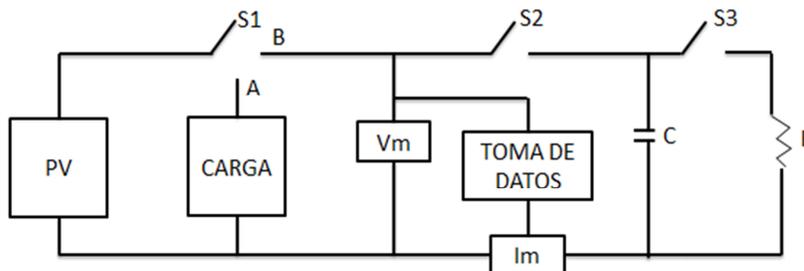


Figura 3 - Esquema general Trazador I-V.

3.2. Fuente de alimentación

El dispositivo no es un sistema autónomo, por lo que requiere alimentación externa. Para esto se utiliza el puerto USB de la computadora que además de permitir la comunicación serial, entrega al dispositivo los 5V que requiere el microcontrolador para funcionar. También es posible conectarlo a un tomacorrientes utilizando un adaptador de 220/110 a 9V DC, de 100 a 500mA, con un conector cilíndrico de 2.1mm con terminación positiva y exterior negativo (siempre y cuando la comunicación serial no sea necesaria).

3.3. Temporización

El muestreo no es continuo, por lo tanto se necesita de un reloj que indique al dispositivo cuándo debe activarse y desactivarse. Para este propósito se emplea un reloj en tiempo real ultrapreciso, Chronodot V2.0 que como indica Macetech [24] en su documentación, no pierde segundos por tiempo de uso o temperatura y éste le indica al microcontrolador Arduino que debe tomar muestras cada hora de 6 a.m. a 7 p.m. y entrar en modo de ahorro de energía durante la noche.

3.4. Interrupción

El sistema tiene tres etapas (Figura 3) por lo que es necesario contar con interruptores que las separen, los interruptores empleados son relés, debido a su bajo costo y a que es posible corregir el ruido que introducen en programa. Los relés son de 5V DC porque es el voltaje que puede entregar el microcontrolador, pero como demandan más corriente de la que entrega el microcontrolador, entonces se utilizan transistores para controlarlos, conectados como se observa en la Figura 4. El primer interruptor (S1) conecta el panel al Trazador I-V y lo desconecta de su carga y viceversa. El segundo interruptor (S2) conecta el panel a una carga capacitiva y al subsistema de adquisición de datos, cuando el muestreo es completado, la carga capacitiva es desconectada del panel y un tercer interruptor (S3) conecta dicha carga a una resistencia de drenaje que permite a los capacitores descargarse por completo, de modo que estén listos para la siguiente toma de datos.

3.5. Acondicionamiento de señal

La señal proveniente del panel solar es muy alta para el microcontrolador Arduino, entonces es necesario adaptarla para evitar el daño del microcontrolador. Para este propósito se emplea un divisor de voltaje, con resistencias de alto valor para evitar pérdidas en corriente, que permite que la señal no sobrepase los 5V. Los valores para el divisor de voltaje se definieron como se muestra en las ecuaciones 5, 6, 7 y 8; los valores de las resistencias deben ser altos para no perder corriente en esta etapa.

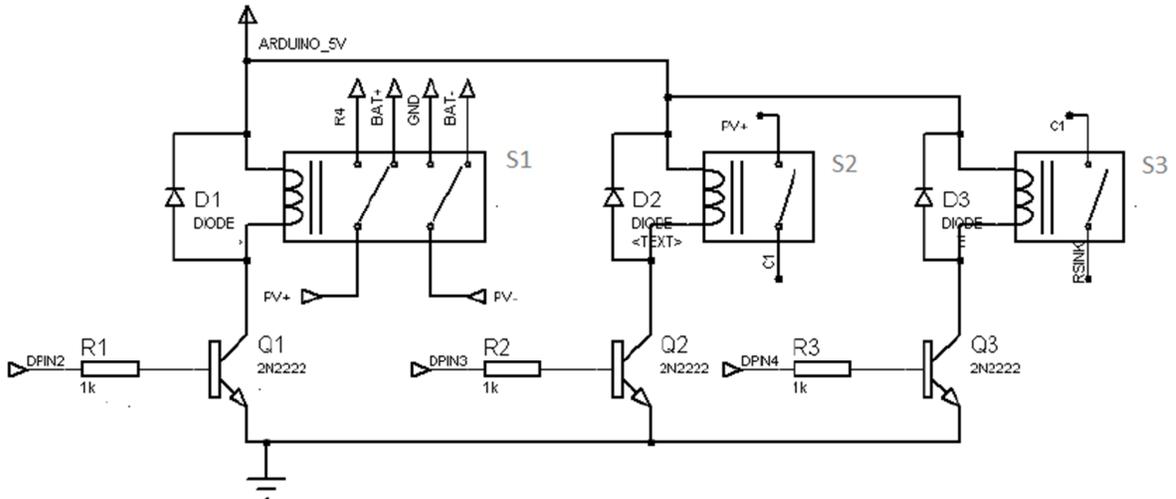


Figura 4: Esquema de relés de control de interrupción.

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (5)$$

$$\frac{5}{21.6} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

$$0.3125R_1 = R_2 \quad (7)$$

Se define un valor comercial para R_2 , que debe ser un valor alto para evitar la pérdida de corriente por el divisor, y queda:

$$R_1 = \frac{12000}{0.3125} = 38400\Omega \quad (8)$$

El valor comercial más próximo a $38,4k\Omega$ es $39k\Omega$, sin embargo, si se utiliza ese valor, utilizando la ecuación 5 se puede observar que con un mínimo incremento de voltaje en el panel, ecuación (9), el voltaje que entra al módulo ADC, supera los 5 V.

$$V_{out} = \frac{12000}{12000+39000} * 2.17 = 5.106V \quad (9)$$

Por esta razón el valor seleccionado para R_1 es $40k\Omega$, que pese a no ser un valor comercial, es simple de obtener, usando dos resistencias en serie. Al usar las resistencias en serie, se mide el valor final que se obtiene de éstas y se utiliza para realizar el cálculo de la señal acondicionada, empleando la ecuación (5).

3.6. Adquisición de datos

Para obtener muestras de voltaje el sensor utilizado es el conversor analógico-digital (ADC) de Arduino, que es un ADC de 10 bits, usando un voltaje de referencia igual a su voltaje de alimentación de 5V el sistema tiene una resolución de 4.9mV (nominal). Ese valor se obtiene como se muestra a continuación:

$$\frac{5}{2^{10}} = 0.00488V \approx 4.9mV \quad (10)$$

Este valor es el valor teórico dado por las especificaciones del microcontrolador, sin embargo este valor del voltaje de referencia utilizado por el ADC, varía al conectar el dispositivo en el computador y al activar los relés, por lo tanto el valor de voltaje medido empíricamente con dos voltímetros FLUKE que dan el valor real más aproximado que será utilizado para este dispositivo de bajo costo, fue de 4.78V, entonces el valor real para la resolución es de:

$$\frac{4.78}{2^{10}} = 0.00466V \approx 4.7mV \quad (11)$$

Para la corriente se utiliza una resistencia “shunt”, es decir una resistencia de valor muy bajo, en el extremo de la carga más próximo a tierra y el voltaje que pasa por ella es medido por el ADC de Arduino, para calcular la corriente se utiliza la Ley de Ohm. El panel entrega 1.93A como máximo, por seguridad el cálculo para la resistencia se hará con el valor de 2A para la máxima caída de voltaje. La resolución del microcontrolador es de 4.7mV, por lo que cualquier cambio inferior a 5mV significara ruido, pérdida de señal y por lo tanto imprecisión en los datos medidos. Para este diseño, se tendrá como máxima caída de voltaje 100mV, que representa el 2.16% de la señal completa, que por lo tanto es admisible para tener al menos 5% de precisión en los datos medidos. Con estos datos, se calcula el valor necesario para la resistencia, usando la Ley de Ohm, como se muestra en la ecuación (12).

$$R = \frac{0.1}{2} = 0.05\Omega \quad (12)$$

La ubicación de esta resistencia será en el extremo menos positivo del circuito, es decir, en el extremo más próximo a tierra, logrando que la caída de 100mV no supere el valor máximo aceptado por el microcontrolador Arduino.

Es necesario calcular el tiempo de barrido de la curva para diferentes condiciones de sol, el tiempo de barrido depende del valor del capacitor, de V_{oc} y de I_{sc} , por este motivo el tiempo de barrido no es fijo, si no que se calcula antes de cada muestreo de curva.

El valor del capacitor requerido por el sistema se obtiene a través de:

$$V_{oc} = \frac{I_{sc}}{C} * T_{sweep} \quad (13)$$

El microcontrolador Arduino, requiere aproximadamente 100 μs para leer un dato analógico, y se requieren 200 muestras para cada curva (100 de voltaje y 100 de corriente), por lo tanto, se tiene:

$$T_{muestreo} = 100\mu s * 200 \text{ muestras} \quad (14)$$

$$T_{muestreo} = 20ms$$

A ese tiempo, es necesario aumentar el tiempo que tomará llevar a cabo algunas instrucciones, por lo que se da un margen de $1\mu s$ por muestra, siendo necesario un total de 30ms para el muestreo. Despejando el valor de C de la ecuación (13), se obtiene:

$$C = \frac{I_{SC}}{V_{OC}} * T_{sweep} \quad (15)$$

Y reemplazando los valores conocidos por las características del panel, con los máximos valores que puede entregar, se tiene que la capacitancia necesaria es de:

$$C = \frac{1.93A}{21.6V} * 30ms$$

$$C = 2,680mF \approx 2200\mu F$$

Dentro de los valores comerciales, el más próximo sería el de $2200 \mu F$ pero, como se trata de unidades tan pequeñas, y los valores no son precisos, es preferible optar por un valor mayor, de modo que el tiempo de barrido sea suficiente, tomando como valor para este diseño, dos capacitores de $2200 \mu F$. Con estos valores calculados, el diseño del trazador de curva queda como se muestra en la Figura 5.

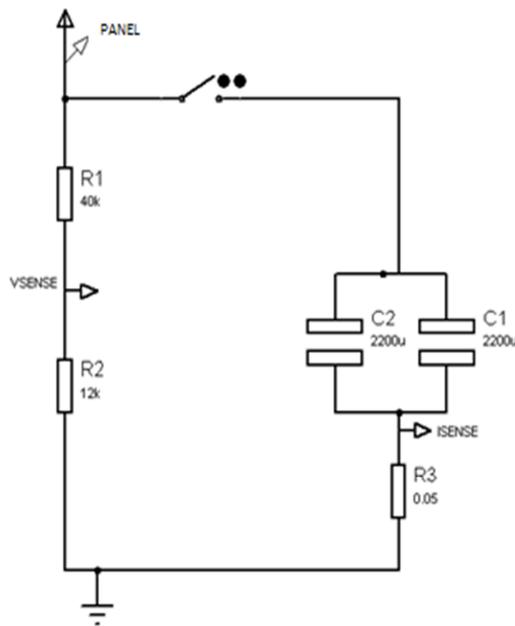


Figura 5 - Esquema de trazador I-V.

3.7. Almacenamiento de datos

Los datos se observan a través de un monitor serial, “Hyper Terminal”, este monitor permite almacenarlos en archivos en formato .csv (Comma Separated Values) que permite el manejo de la información en hojas de datos.

```

2013/05/21 10:40:22
VOC = 19.3729934692
ISC = 1.4817899703
19.3729934692,1.4817899703
2.8219377517,1.4817899703
4.1153259277,1.4817899703
5.3695206642,1.4817899703
6.6237149238,1.4817899703
7.8387160301,1.4817899703
9.0537176132,1.4144357681
10.2687187194,1.4144357681
11.4249286651,1.4144357681
12.5419464111,1.3470817804
13.6001729965,1.2797276973
13.6785602569,1.2797276973
13.7373495101,1.2797276973
13.8157367706,1.2797276973
13.8745279312,1.2797276973
13.9137220382,1.2797276973
13.9921092987,1.2123734951
14.0313024520,1.2123734951
14.1096897125,1.2123734951
14.1488819122,1.2123734951
14.2272691726,1.2797276973
14.2860603332,1.2123734951
14.3448505401,1.2123734951

```

Figura 6 - Datos en hyper terminal.

4. VALIDACIÓN Y PRUEBAS

4.1. Precisión y límites de los instrumentos

El microcontrolador Arduino tiene definida su resolución de voltaje por su convertor analógico-digital. Esta resolución depende directamente de la alimentación que recibe el Convertor Analógico-Digital (ADC), que es el que usa como voltaje de referencia. Por este motivo, el valor de 5V es nominal y es necesario conocer con exactitud que voltaje ingresa como alimentación del microcontrolador y referencia del ADC. El voltaje real medido como alimentación del ADC, es de 4.78V, que para 10 bits da una resolución de 4.66mV. Se calcula entonces, empleando la ecuación (5), la resolución de voltaje antes de ingresar en el divisor de voltaje.

$$V_{in} = \frac{0.00466}{\frac{120120}{120120+39410}} = 0.019V$$

Se realiza el cálculo para la resolución de corriente con el mismo valor del ADC de 10 bits, de 4.66mV, aplicando la Ley de Ohm,

$$I = \frac{0.00466}{0.068} = 0.0685A$$

4.2. Validación de datos con puntos de I y V tomados manualmente

La validación de los datos se realizó comparando los resultados medidos por el Trazador I-V con los datos de corriente y voltaje medidos manualmente empleando dos multímetros FLUKE, uno como voltímetro y otro como amperímetro, en diferentes valores de resistencias conectadas al panel, que hacen la vez de una carga variable, también se midieron Voc e Isc por separado. La estimación del error se realizó tomando los puntos medidos por los multímetros como reales y calculando la diferencia entre estos y los de la curva medida por el Trazador I-V.

Las pruebas se realizaron en un día claro, esperando obtener una mínima variación de las condiciones solares entre una medida y otra. Se tomaron muestras para diez curvas diferentes, a distintas horas. En la Figura 7 se muestran las curvas obtenidas por ambos muestreos.

TRAZADOR DE CURVAS I-V DE CÓDIGO ABIERTO...

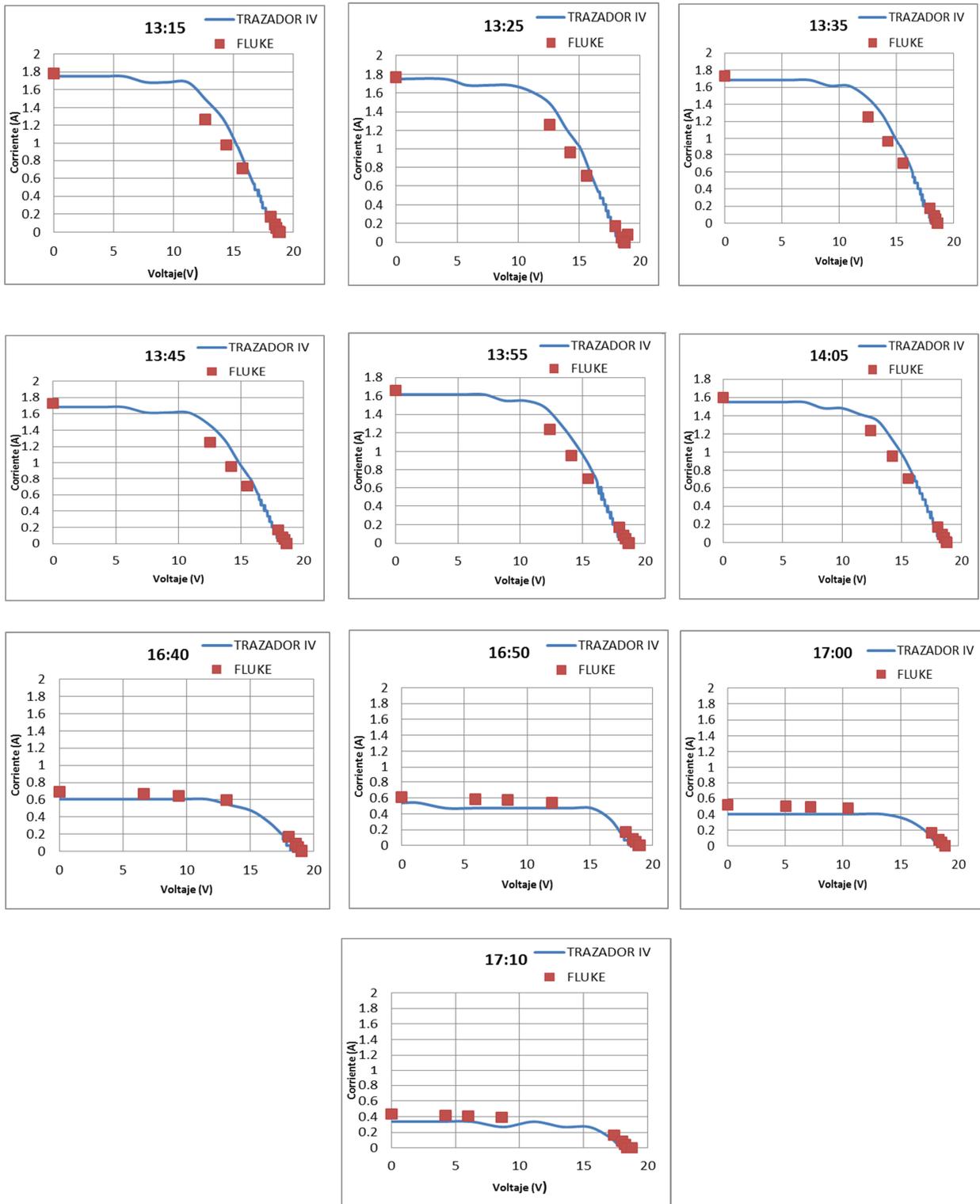


Figura 7 - Curvas muestreadas por el dispositivo y manualmente. Curva azul medida por trazador I-V, puntos rojos medidos por el multímetro.

Obteniendo la diferencia entre cada punto, se toma en cuenta la mayor para cada curva, y con estos valores calcular el error. En la Tabla 2 se muestran los máximos para corriente y para voltaje.

TABLA 2 - DIFERENCIA MÁXIMA ENTRE PUNTOS MANUALES Y PUNTOS DE TRAZADOR I-V EN CORRIENTE Y VOLTAJE

HORA	MAX IfIuke-Ireal	MAX VfIuke-Vreal
13:15	0.10700	0.23000
13:25	0.10060	0.31400
13:35	0.12680	0.26820
13:45	0.14870	0.19000
13:55	0.10090	0.17852
14:05	0.10100	0.36000
16:40	0.08881	0.10800
16:50	0.12350	0.10240
17:00	0.11284	0.12500
17:10	0.09723	0.14200

Para estimar el error, se saca el promedio de los máximos obtenidos.

$$Error_I = \frac{0.107+0.1006+0.1268+0.1487+0.1009+0.101+0.08881+0.1235+0.11284+0.09723}{10} = 0.110738 \quad (16)$$

$$I = I_{medido} \pm 0.1 \quad (17)$$

$$Error_V = \frac{0.23+0.314+0.2682+0.19+0.17852+0.36+0.108+0.1024+0.125+0.142}{10} = 0.201812 \quad (18)$$

$$V = V_{medido} \pm 0.2 \quad (19)$$

Para V_{oc} e I_{sc} se considera la diferencia máxima medida para cada uno de estos valores.

$$I_{SC} = I_{SC_{medido}} \pm 0.116$$

$$V_{OC} = V_{OC_{medido}} \pm 0.23$$

Este error puede deberse a la variación que existe en el voltaje de referencia, lo que hace que el microcontrolador entregue valores con esta diferencia respecto a los reales al realizar la conversión analógico digital.

4.3. Cálculo de la potencia real vs. potencia estimada

El trazador I-V permite conocer la potencia eficaz entregada por el panel solar bajo diferentes condiciones climáticas. Generalmente éste cálculo se hace al momento de realizar el dimensionamiento del sistema, usando las características del panel dadas por el fabricante y estimaciones de factores ambientales (como temperatura y radiación solar). Sin embargo, este método de estimación no es exacto y puede introducir errores significativos, especialmente en el caso en que el panel esté sucio, dañando o degradado y no está funcionando según las especificaciones de fábrica. Monitoreando el funcionamiento de un sistema de energía solar se puede observar estas desviaciones de un rendimiento estimado del panel.

Para demostrar esta funcionalidad del trazador de curva I-V se realizó un monitoreo del rendimiento del panel solar por una semana entera y se comparó la potencia medida por día con la potencia estimada por día, y se muestra que utilizando un método estándar de estimación de rendimiento existen grandes errores a comparación del rendimiento medido con el dispositivo.

El método más común y sencillo para estimar la potencia que se producirá un panel solar se realiza a partir de las horas de “sol pico” [22]. La intensidad de la radiación solar varía durante del día, pero las especificaciones de fábrica del panel se aplican para condiciones estándar de testeo: la temperatura de panel es 25°C y el espectro solar es el AM1.5 que cual significa una intensidad de la radiación de 1000 W/m². Se resuelve este problema calculando el número de

horas en las que la radiación solar es igual 1000 W/m^2 (sol pico) equivalentes a la radiación solar total en el curso de un día. Entonces la potencia estimada se calcula multiplicando el número de horas de sol pico por la potencia dada por el fabricante y haciendo una corrección para la temperatura de operación esperada del panel.

Para realizar la comparación entre el método descrito y los datos obtenidos del Trazador I-V, se empleó un piranómetro modelo CMP6 de Kipp Zonen para grabar la radiación solar diaria, como se muestra en la Figura 8, y a partir de esta gráfica se calcula el número de horas de sol pico.

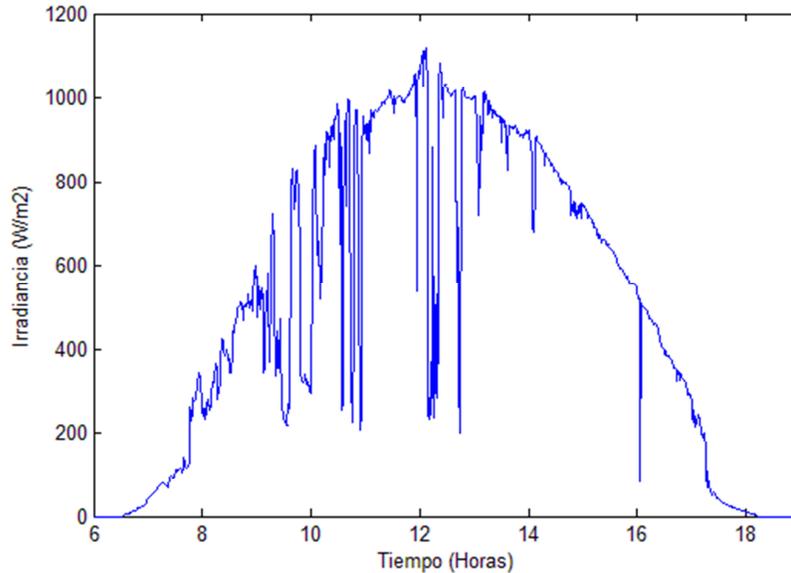


Figura 8 - Radiación solar en un día.

Al integrar la curva mostrada en la Figura 8, se obtiene la potencia entregada por el sol en Watts por hora:

$$P = 6.4651 \text{ kWh} / \text{m}^2$$

Este valor es equivalente a decir que hay seis horas de sol pico en el día, de acuerdo a los cálculos que se realizan a continuación; se calcula también la potencia máxima que puede entregar el panel, según sus especificaciones.

$$\frac{6.4651 \text{ kWh}}{\text{m}^2} * \frac{1 \text{ sol pico}}{100 \text{ Wm}^{-2}} \approx 6 \text{ horas de sol pico} \quad (20)$$

$$P_{\text{max}} = 1.74 * 17.2 = 29.98 \text{ W} \quad (21)$$

Con estos dos valores, se puede obtener cuánta energía debería entregar el panel, con las condiciones de sus especificaciones:

$$\text{Energía diaria} = 29.928 * 6 = 179.568 \frac{\text{W} \cdot \text{hr}}{\text{día}} \quad (22)$$

La potencia máxima (29.928 W) está dada por la fábrica bajo “condiciones de prueba estándar” que son 1000 W/m^2 de radiación y 25°C de temperatura. Como la temperatura de operación del panel es normalmente mucho mayor, es necesario también realizar un ajuste al valor obtenido de potencia diaria entregada por el panel, con un coeficiente de temperatura, que permite determinar la caída de voltaje que existe por el aumento de temperatura del panel durante el día. Es posible calcular con bastante aproximación la temperatura del panel usando la ecuación (23) que muestra Messenger [25].

$$T_p = T_A + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) E \quad (23)$$

Para NOCT (Temperatura Nominal de Operación de Celda) se usan 50°C dados en las especificaciones del panel y para T_A (Temperatura Ambiente) se emplean 25°C. (Notar que el dato de temperatura ambiente no fue medido, si no que en su lugar se utiliza la temperatura diaria promedio para Cochabamba en el mes de abril, que es el valor que se usa típicamente en una estimación de potencia del panel a partir de las especificaciones del fabricante). Reemplazando estos valores en la ecuación (23), la temperatura ambiente promedio del día igual a 25°C, NOCT (Temperatura Nominal de Operación de Celda) de las especificaciones del panel igual a 50°C, y E igual a 1, proveniente de los 1000W/m² cuando hay sol pico, se obtiene la temperatura del panel:

$$T_p = 25 + \left(\frac{50-20}{0.8} \right) * 1 = 62.5^\circ C$$

Con este dato es posible realizar la corrección de potencia diaria que debería entregar el panel, cuando no se encuentra bajo condiciones ideales, con una disminución del 0.5%/°C aproximadamente como muestra Masters[26], empleando la ecuación (24) se obtiene:

$$P_{estimada} = P_{ref} (1 - \% (T_{op} - T_{ref})) \tag{24}$$

$$P_{estimada} = 179.568(1 - 0.005 * (62.5 - 25))$$

$$P_{estimada} = 145.899W$$

Por otro lado, con el trazador de curva I-V se mide la potencia máxima entregada por el panel cada 10 minutos, cuyos datos se muestran en la Figura 9. Al integrar la curva de la Figura 9, se obtiene la potencia producida por el panel en un día, es decir, watts producidos por hora, que es el valor que se muestra a continuación:

$$Energía\ diaria = 117.9273 \frac{W \cdot hr}{día}$$

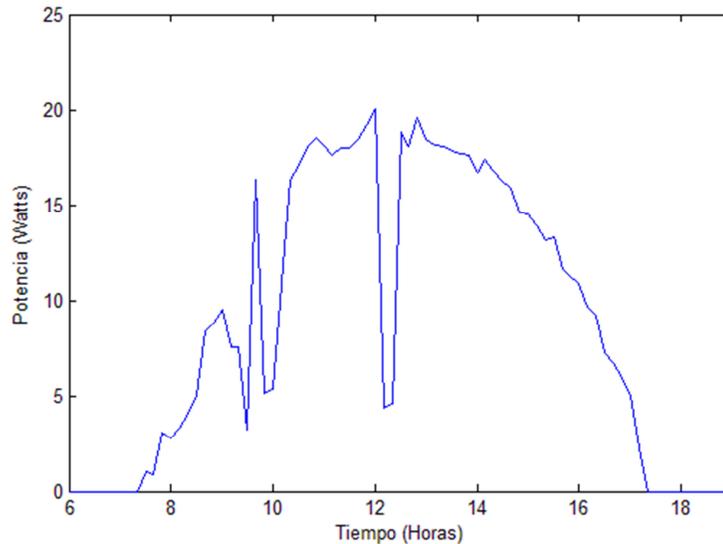


Figura 9 - Potencia entregada por el panel en un día.

En la Figura 10 se observan las gráficas de radiación solar medida por el piranómetro (izquierda) y las de potencia del panel medidas por el trazador I-V (derecha) para siete días.

Con las integrales de las gráficas mostradas en la Figura 10, es posible hacer los mismos cálculos para comparar la potencia estimada y la potencia real. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos.

Se puede observar que se repite la situación que se dio en el cálculo mostrado anteriormente, donde la potencia estimada con las características del panel y con la corrección de temperatura (considerando temperatura ambiente de 25°C), no reflejan un resultado próximo a la realidad; en todos los casos, éste es superior al resultado real obtenido con el trazador de curva I-V.

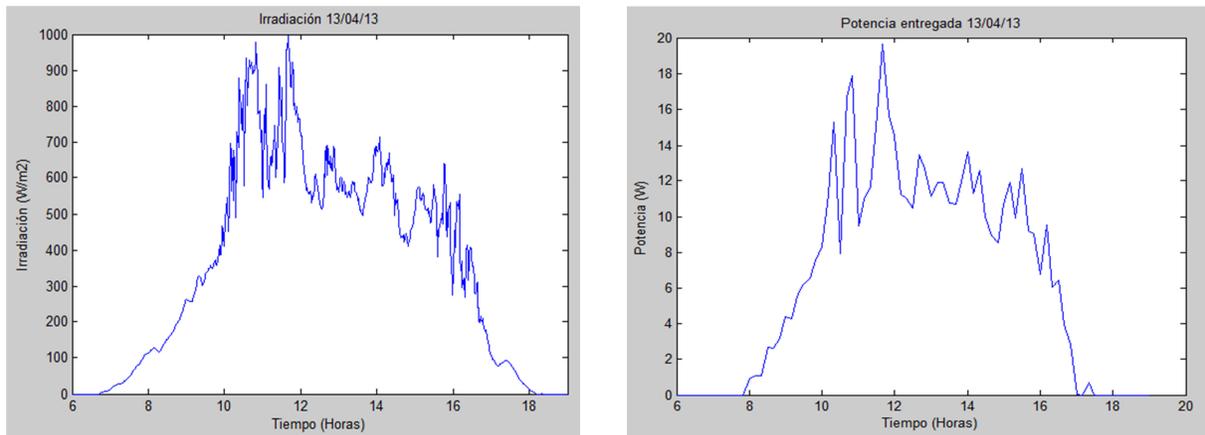


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 14/04/13.

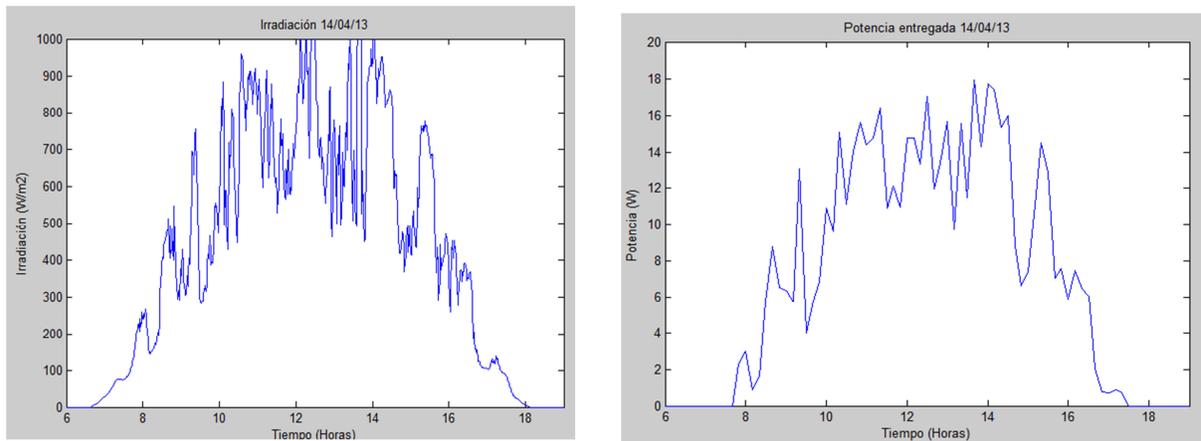


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 14/04/13.

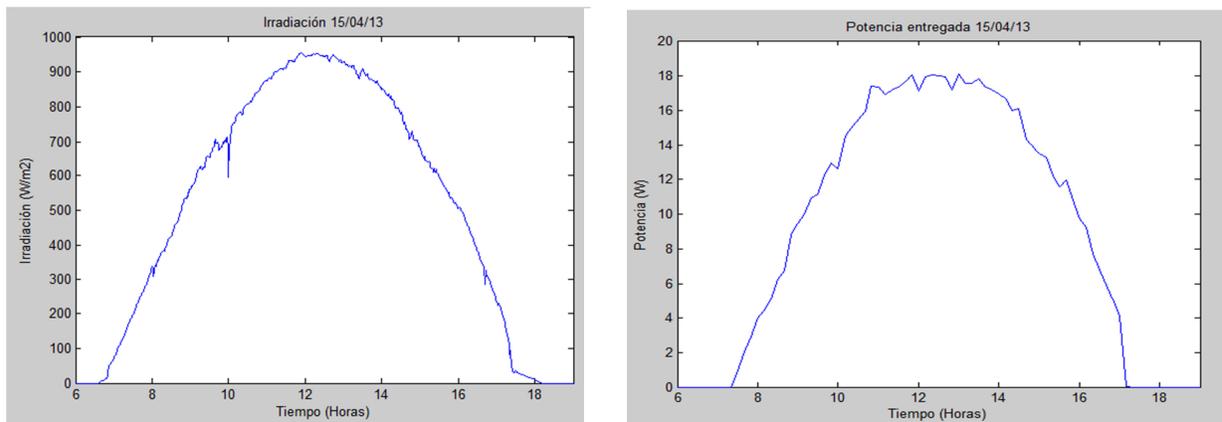


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 15/04/13.

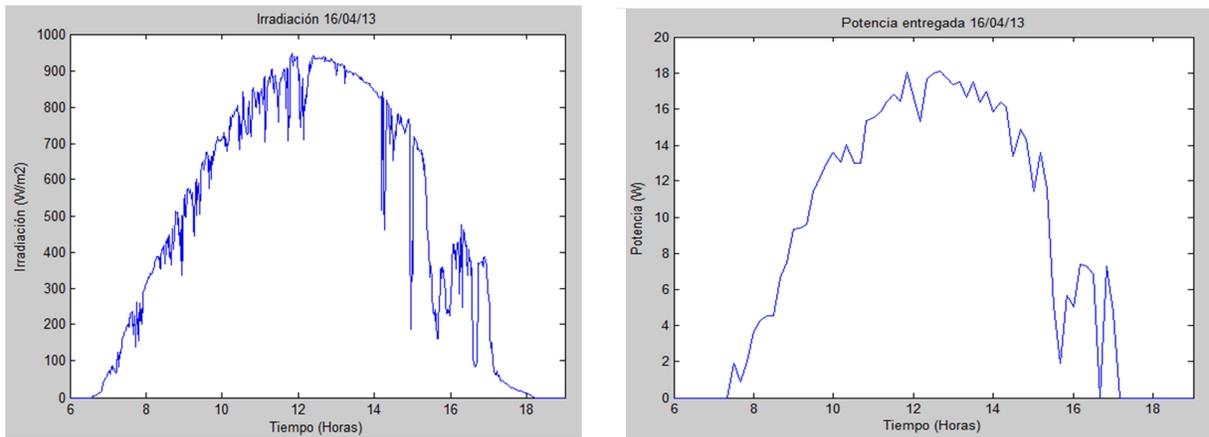


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 16/04/13.

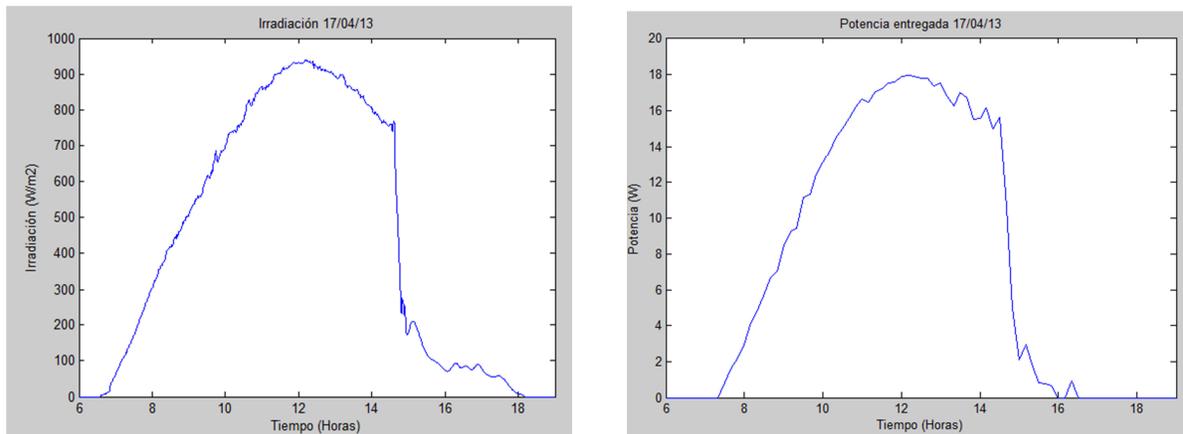


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 17/04/13.

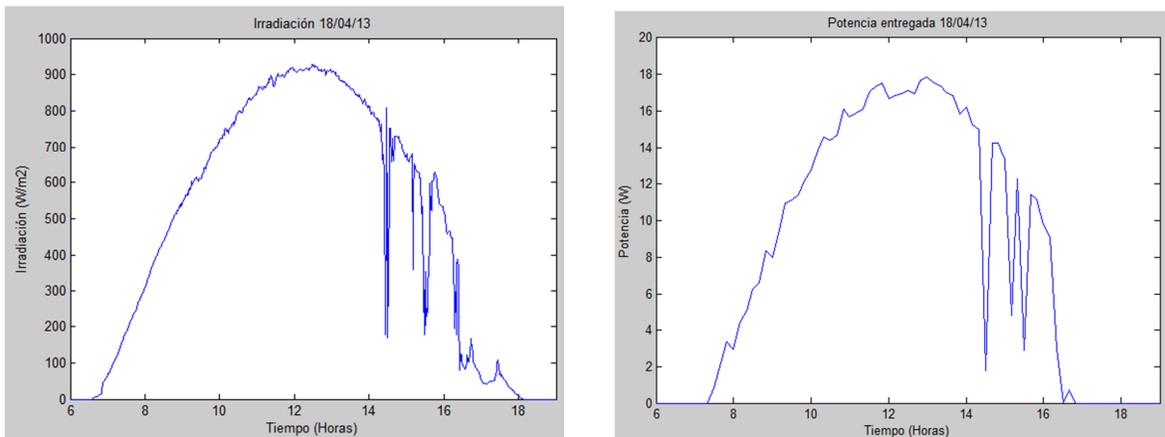


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 18/04/13.

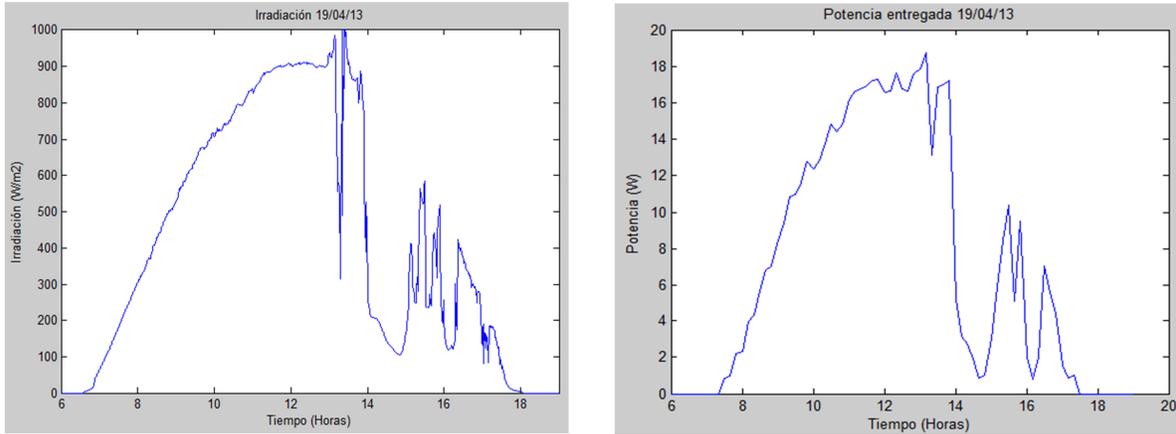


Figura 10 - Potencia medida piranómetro vs. Potencia entregada por el panel en una semana – día 19/04/13.

TABLA 3 - CÁLCULO DE POTENCIA ESTIMADA Y POTENCIA REAL PARA UNA SEMANA

Fecha	Energía piranómetro (kWh)	Horas de sol pico aprox.	Energía estimada (W*hr/día)	Energía estimada corregida (W*hr/día)	Energía real (W*hr/día)	Error Porcentual (%)
13/04/13	4.6338	4	119.712	97.266	85.4435	13.84
14/04/13	5.4499	5	149.64	121.5825	94.8249	28.22
15/04/13	6.6808	6	179.568	145.899	121.6349	19.95
16/04/13	6.1546	6	179.568	145.899	111.0785	31.35
17/04/13	5.5375	5	149.64	121.5825	96.9859	25.36
18/04/13	6.2122	6	179.568	145.899	107.4851	35.74
19/04/13	5.4438	5	149.64	121.5825	94.4798	28.69

De acuerdo a la Tabla 3, en el mejor de los casos se hace una sobreestimación de potencia de casi el 14%, mientras que en el resto de los casos ésta se encuentra alrededor del 30%, lo que significa que si se implementara un sistema en base a los cálculos de potencia estimada, el sistema no proveería la cantidad necesaria de potencia para las horas de sol pico que se tienen en un día, y por lo tanto, no funcionaría de manera óptima. Esta diferencia es tanta que es posible que el panel monitoreado haya estado dañado o degradado. En un futuro trabajo podría monitorearse también la temperatura del panel para poder obtener una comparación más exacta.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño y las características de un trazador de curva I-V automático de código abierto, para un panel solar específico, con posibilidad de modificar el diseño para adaptarlo a otros paneles de diferentes características. También se mostraron los resultados experimentales obtenidos de curvas I-V medidas por el trazador y el error de estos en comparación a valores medidos por un multímetro de alta calidad. El dispositivo implementado funciona de forma automática y almacena los datos en una computadora a través del puerto serial.

El uso del dispositivo puede proveer una buena información del funcionamiento de un elemento fotovoltaico, obteniendo la potencia diaria producida por el panel en lugar de emplear un método de estimación. Aun con el nivel de error que existe, permite realizar el monitoreo por un tiempo extendido o una comparación del comportamiento actual del panel con las especificaciones de la fábrica. La información es mucho más completa que la que ofrecen otros métodos de monitoreo de rendimiento de bajo costo, como el uso de un controlador de carga con *MPP tracking*. Con el uso de aparatos de código abierto como el Arduino, la construcción del dispositivo es sencilla, rápida y económica. En futuros trabajos se desea mejorar la precisión del dispositivo monitoreando otros factores como la temperatura del panel y de ser posible realizar una calibración con elementos certificados, pero el diseño actual puede permitir a un investigador que no tiene acceso a un trazador de curva I-V profesional, una manera de monitorear el panel solar y sacar su rendimiento.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta de Hogares 2011*, La Paz, 2011.
- [2] M. H. Fernandez et al. “Energías renovables para el acceso universal al Departamento de Cochabamba,” presentado en Ier Simposio Nacional de Energías Renovables y Miniforo IBEROEKA “Uso de las Energías Renovables en Sistemas Productivos.” Cochabamba, 2-5 de octubre 2012.
- [3] T. Cebecauer et al. “Uncertainty sources in satellite-derived direct normal irradiance: how can prediction accuracy be improved globally,” presented in *SolarPACES Conf. Granada, Spain*, pp. 20–23, 2011.
- [4] C. A. Gueymard. “Uncertainties in modeled direct irradiance around the sahara as affected by aerosols: Are current datasets of bankable quality?” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 133, no. 3, pp. 1-13, 2011.
- [5] C. Gueymard and S. Wilcox. “Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data,” in *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 1068–1084, 2011.
- [6] J. Polo et al. “Solar radiation estimations over India using Meteosat satellite images,” in *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2395–2410, 2011.
- [7] H. T. Nguyen and J. M. Pearce. “Estimating potential photovoltaic yield with r.sun and the open source Geographical Resources Analysis Support System,” in *Solar Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 831–843, 2010.
- [8] A. Ortega. “The state of solar energy resource assessment in Chile,” in *Renewable Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2514–2524, 2010.
- [9] M. Kandlikar and A. Sagar. “Climate change research and analysis in India: an integrated assessment of a South–North divide.” *Global Environmental Change*, vol. 9, no. 2, pp. 119–138, 1999.
- [10] S. Karlsson, The North-South knowledge divide: consequences for global environmental governance. In D. C. Esty & M. Ivanova (Eds.), *Strengthening Global Environmental Governance: Options and Opportunities*. New Haven: Yale School of Forestry and Environmental Studies. 2002.
- [11] M. Simon and E. Meyer. “The Effects of spectral evaluation of c-Si module.” Internet: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.973/abstract>, 14 de Julio de 2010[18 de diciembre de 2013].
- [12] National Renewable Energy Laboratory. Photovoltaics Research. “Outdoor Test Facility.” Internet: http://www.nrel.gov/pv/facilities_otf.html, 31 de agosto de 2011[14 de abril de 2013].
- [13] G. Coley. “Take advantage of open-source hardware.” Internet: <http://www.edn.com/design/systems-design/4313253/Take-advantage-of-open-source-hardware>, 20 de agosto de 2009[12 de diciembre de 2013].
- [14] S. Davidson. “Open-source hardware,” in *IEEE Design and Test of Computers*, vol. 21, no. 5, pp. 456–456, 2004.
- [15] N. Bergmann. “Low cost prototyping system for sensor networks.” *Sensors, Sensor Network*, pp. 19–24, 2010.
- [16] C. Harnett. “Open source hardware for instrumentation and measurement.” *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, June, 2011.
- [17] J. M. Pearce. “The case for open source appropriate technology.” *Environ Dev Sustain*, vol. 14, no. 3, pp. 425–431, 2012.
- [18] S. M. Maurer et al. “Finding cures for tropical diseases: is open source an answer?” in *PLoS medicine*, vol. 1, no. 3, 2004.
- [19] J. Alderman. “Wireless IV Curve Tracer for long term field testing.” Internet: <http://jalderman.org/?p=57>, 28 de septiembre de 2010[2 de Julio de 2012].
- [20] A. D’Ausilio. “Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment.” *Behavior research methods*, vol. 44, no. 2, 2012, pp. 305–313.
- [21] D. Mellis and L. Buechley. “Collaboration in open-source hardware: third-party variations on the arduino duemilanove” *Proceedings of the ACM 2012 conference on*, pp. 1175–1178, 2012.
- [22] J. Dunlop. *Photovoltaic Systems*. 2da ed., American Technical Publishers, 2010.
- [23] K. Emery and C. Osterwald. “Solar cell efficiency measurements.” *Solar Cells*, vol. 17, pp. 253-274, 1985.
- [24] Ch. Macetech. “V2.0 Real Time Clock.” Internet: http://docs.macetech.com/doku.php/chronodot_v2.0, 2013[11 de febrero de 2014].
- [25] R. Messenger and J. Ventre. *Photovoltaic systems engineering*. 2da ed., CRC Press, 2003.
- [26] G. Masters. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, New Jersey, 2004.