



## Estación Solar de la FPUNE. Curvas Características y Eficiencia de Panel Solar

Derlis González, Alberto Rojas  
Facultad Politécnica. Universidad Nacional del Este

### Paraguay

#### RESUMEN

Este trabajo presenta las curvas características de potencia-tensión (curva P-V) y de corriente-tensión (curva I-V) de un panel fotovoltaico (FV) de la estación solar de la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional del Este. Estas curvas de trabajo, respectivamente, permiten estimar con gran precisión el punto de máxima potencia de salida del panel, así como la máxima corriente que el mismo puede entregar sin que decaiga significativamente su tensión de salida. Además se presenta la medición de la eficiencia de conversión energética del panel. Se ha usado la misma luz solar como fuente luminosa para todas las mediciones, a través de varias mediciones que han sido promediadas, se ha obtenido un valor que responde a las condiciones del local donde es utilizado.

#### PALABRAS CLAVES

Panel fotovoltaico, energía solar, insolación, irradiancia, curva I-V.

#### 1 INTRODUCCIÓN.

El sol es por mucho la principal fuente energética del planeta, la energía de origen fotovoltaico ha de ser en las próximas décadas una de las principales fuentes de electricidad del mundo. Casi en todo el territorio paraguayo se dispone de buenas condiciones de radiación solar [2]. Y aún quedan pequeñas poblaciones sin servicio eléctrico en zonas geográficamente aisladas que presentan un perfil favorable para su electrificación mediante plantas solares fotovoltaicas.

El silicio, elemento fundamental para la construcción de celdas FV, es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. En cuanto a la energía, el Sol provee mucho más de la que se podría usar, a razón de unos 174 millones de millones de Kw. (174.000.000.000.000 kilojoules por cada segundo). En una hora la Tierra recibe del Sol más energía que la suma de todas las formas de energía utilizada en un año [1].

Por estas razones el centro de Investigación de la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional del Este (CIFPUNE) estudia el aprovechamiento de la energía FV, a través de una línea de investigación permanente que contempla la construcción de una estación solar.

El principal objetivo de este trabajo es presentar algunos datos y curvas características del rendimiento de un panel FV de la estación solar del CIFPUNE. También son descriptos algunos conceptos fundamentales y cuestiones referentes a la naturaleza de la energía solar.

#### 2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

##### 2.1 Irradiancia.

La potencia de la radiación solar (energía/tiempo) que se recibe en un instante dado en un captador de una superficie determinada se conoce como **irradiancia** ( $G$ ) y se mide en unidades de  $W/m^2$  [3].



El valor de la radiación que llega a la parte externa de la atmósfera terrestre proveniente del sol varía durante el año cerca del 3 %. Esto es debido a que la distancia sol-tierra varía en torno de 1,7 % por la excentricidad de la trayectoria anual de la tierra alrededor del sol, siendo esta distancia media de  $1,5 \times 10^8$  km. Frohlich, en el año 1977 ha obtenido para el valor de irradiancia el valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ , para la radiación que llega del sol a la parte exterior de la atmósfera terrestre, sobre una superficie perpendicular a los rayos solares. Este valor ha sido adoptado por la World Radiation Center (WRC) [4].

La irradiancia igual a  $1 \text{ KW/m}^2$  (cielo claro) es conocida con el nombre de *SOL*, esta es una magnitud estandarizada para evaluar la potencia de salida máxima de un panel FV.

Recordando que  $1\text{m}^2 = 10.000 \text{ cm}^2$ , y que  $1 \text{ KW} = 1.000 \text{ W}$ , se tiene que:  $1 \text{ SOL} = 1 \text{ KW/m}^2 = 1000 \text{ W/m}^2 = 100 \text{ miliwattios/cm}^2$ .

## 2.2 *Insolación.*

La cantidad de energía solar (directa, difusa y reflejada) que se recibe durante la duración del día, en un punto determinado del planeta, sobre una superficie colectora horizontal de  $1\text{m}^2$ , recibe el nombre de **insolación**.

Se usan diferentes unidades para expresar el valor de la insolación de un lugar. Una de las más comunes es el Kilowat.hora por metro cuadrado (KWh/m<sup>2</sup>).

La especificación de un panel FV da el valor máximo de potencia que éste puede generar, pero la duración de la luz solar varía día a día y momento a momento, dificultando el cálculo de la energía diaria (potencia por tiempo) que puede generarse. Este obstáculo puede solucionarse si la duración del día solar se reduce a un valor promedio fijo que contemple las variaciones en el valor de la insolación para ese lugar y estación del año. Por definición, un valor promedio debe ser obtenido llevando a cabo mediciones en ese lugar durante un largo período de tiempo. Esta última condición asegura que no habrá distorsiones cuando se midan variaciones estacionales inusuales para un determinado año. Un período mínimo de diez años de mediciones diarias de la insolación es necesario para generar un valor confiable, que posteriormente puede ser actualizado cuando la acumulación de mediciones posteriores indique que el promedio anterior necesita una corrección.

## 2.3 *Día solar.*

El **día solar (DS)** representa el valor promedio de horas, del total de horas entre el amanecer y el anochecer, durante el cual un sol "equivalente" (con radiación constante de 1 SOL) es capaz de generar la misma cantidad de energía que el sol verdadero entrega, en promedio, en esa localidad, para esa época del año.

La radiación sufre desigual absorción por cada longitud de onda que compone la radiación solar. La luz del sol para un día nublado tiene menos energía pues algunas longitudes de onda componentes han sido atenuadas o absorbidas. Este mecanismo se intensifica cuando los rayos solares deben atravesar mayores distancias, y explica el cambio tonal de la luz solar durante su recorrido diurno.

## 2.4 Masa de aire.

La **masa de aire** ( $M$ ). Esta frase define, indirectamente, la distancia del sol a un observador fijo sobre la Tierra por medio de la altura del sol respecto al horizonte. Cuando el sol ha alcanzado el zenit, la distancia entre el observador y el sol es mínima, ya que los rayos solares caen formando un ángulo de  $90^\circ$  respecto al horizonte. Cuando el sol está más cercano al horizonte, la  $M$  crece, y la distancia que deben atravesar los rayos para alcanzar la posición del observador se incrementa.

A la posición del zenit se asigna, como referencia, una masa de aire unitaria ( $M_1$ ). Para cualquier otra distancia la masa de aire está dada por la relación:

$$\text{Masa de Aire} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo formado entre la posición de zenit y la posición del sol en el momento de la observación. El valor  $M_0$  está reservado para el espectro luminoso fuera de la atmósfera y no puede ser derivado de la Ec. (1).

La fuente luminosa usada para medir la potencia máxima de salida de un panel FV tiene un espectro luminoso correspondiente a  $M_{1,5}$  [5].

Actualmente, las tablas o los mapas de radiación solar se elaboran a partir de mediciones vía satélite o a partir de los datos obtenidos en las ciudades y grandes centros poblados, y raras veces, se tienen en cuenta los niveles de radiación solar a nivel de las zonas rurales. No obstante, estos datos tienen cierta incertidumbre propia de la tecnología empleada, a lo que se suma, que la mayoría de los datos están referidos a grandes extensiones de territorio, por lo que su uso se hace limitado y mayormente referencial.

La radiación total incidente en la superficie terrestre que proviene del sol está formada por la radiación directa, que llega a la tierra en línea recta, y la radiación difusa, generada por los efectos de la dispersión de los componentes de la atmósfera, incluidas las nubes. Una superficie inclinada recibe incluso radiación reflejada por el suelo y por objetos próximos. La razón entre la radiación reflejada y la incidente en la superficie de la tierra se denomina albedo ( $\rho$ ) o reflectividad del suelo. La importancia de la estimación exacta de la irradiancia reflejada aumenta con el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico  $\beta$ , ya que la porción de cielo vista por la superficie inclinada disminuye mientras que la porción de suelo vista por la misma aumenta. La radiación solar global o total que llega a una superficie puede expresarse como la adición de tres componentes: radiación directa más radiación difusa más radiación reflejada.

En el hemisferio sur, un sistema FV fijo debe estar orientado hacia el norte geográfico con una inclinación mayor que la latitud local a fin de recibir los rayos solares de forma uniforme durante todo el año, y tener una inclinación de un ángulo próximo al de la latitud del lugar, para captar un máximo de energía a lo largo del año. Próximo al ecuador terrestre, la mejor posición es la horizontal, con una pequeña inclinación que permita el drenaje de agua de lluvia de la superficie exterior del captador [4].



### 3 CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V Y P-V.

Si un módulo sin carga es expuesto al sol, la tensión media que se forma entre los terminales se denomina **tensión de circuito abierto**,  $V_{oc}$ ; así, no hay circulación de corriente. Se puede medir, a través de un puente entre sus terminales y que incluya un amperímetro, la **corriente de corto circuito**  $I_{sc}$ .

Cuando se conecta una carga, se establecen los valores de corriente y tensión entre los terminales. Variando la carga aplicada se obtienen nuevos puntos, que pueden ser ordenados en una línea denominada **curva característica I-V**.

La norma ABNT (NBR10899/TB-328) define la curva característica de tensión versus corriente como la “representación de los valores de la corriente de salida de un conversor fotovoltaico, en función de la tensión, para condiciones preestablecidas de temperatura y radiación” [4].

El análisis de la curva I-V es de fundamental importancia en la caracterización de un generador fotovoltaico, pues a partir de ella es posible obtener los principales parámetros que determinan su calidad y desempeño.

Una buena celda de Si monocristalino presenta, partiendo del corto circuito, una corriente casi constante, decreciendo levemente con un aumento de la tensión hasta llegar a una “rodilla”, a partir de la cual asume un comportamiento de rápida disminución, hasta cortar casi verticalmente el eje de las tensiones. La potencia fotogenerada, obtenida multiplicando la corriente por la tensión, presenta un máximo nítidamente localizado próximo a la rodilla de la curva I-V (curva continua de la Fig. 1).

Cada punto de la curva de potencia versus tensión se interpreta como potencia generada para una determinada resistencia de la carga (curva discontinua de la Fig. 1). En el módulo, existe un solo punto en el cual la potencia máxima puede ser extraída (en la zona de la rodilla de la curva). Así, el punto de potencia máxima es el producto de la **tensión de potencia máxima** ( $V_{mp}$ ) por la **corriente de potencia máxima** ( $I_{mp}$ ).

La **potencia nominal** de los módulos está dada por la potencia de pico expresada en la unidad  $W_p$  (wattios pico), que se refiere a condiciones estándares de operación: temperatura, irradiancia y masa de aire constantes a 25°C, 1000 W/m<sup>2</sup> y 1,5 respectivamente.

En vista de la conveniencia de extraer siempre la mayor potencia posible del panel fotovoltaico, actualmente se utilizan dispositivos de rastreo del punto de máxima potencia: Maximum Power Point Tracker (MPPT) que mantienen los valores de corriente y tensión eléctrica de trabajo en o muy próximos a sus valores de máxima potencia:  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$  respectivamente.

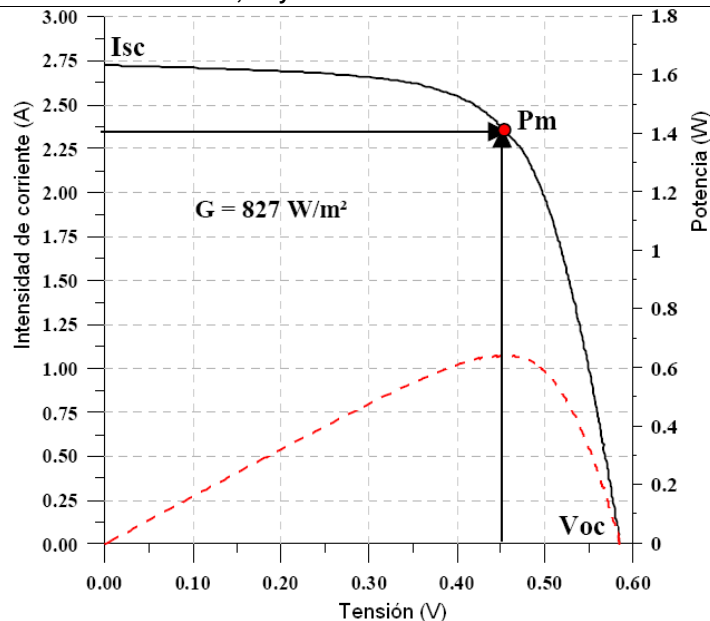
IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
 13, 14 y 15 de Octubre de 2010


Fig. 1. Curva característica I-V (continua) y de potencia P-V (discontinua) para una celda fotovoltaica de  $100 \text{ cm}^2$  [4].

Existen dos conceptos importantes que permiten caracterizar y evaluar la calidad de las celdas:

El **factor de forma (FF)** (Ec. (2)) expresa la aproximación que presenta la curva I-V a un rectángulo. Cuanto más próxima a la forma rectangular sea la curva I-V, mayor será la calidad de la celda. O sea, esta curva puede ser usada para calificar una celda y detectar defectos de fabricación: una buena celda muestra una corriente casi constante, decreciendo levemente con los aumentos de tensión.

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2)$$

La **eficiencia ( $\eta$ )**, (Ec. (3)), definida como la relación entre la máxima potencia eléctrica que una celda solar puede entregar y la potencia de la radiación solar incidente.

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{AG} \quad (3)$$

donde:  $A$  = área útil del módulo ( $\text{m}^2$ ),  $G$  = irradiancia incidente ( $\text{W/m}^2$ ).

Aparte de la resistencia eléctrica de la carga y de la eficiencia de las celdas FV, la irradiancia solar y la temperatura de las celdas influyen significativamente en la potencia de salida del módulo FV. Esto puede estimarse estudiando una familia de curvas I-V tales como las mostradas en la Fig. 2. Para un área de celda solar, la corriente es directamente proporcional a la irradiancia solar  $G$  y es casi independiente de la temperatura  $T$  (Fig. 2 (a)). La tensión y la potencia decrecen según aumenta la temperatura (Fig. 2 (b)). La tensión de las celdas cristalinas decrece cerca del 0,5 % por grado centígrado de aumento de temperatura. Por lo tanto, los paneles FV siempre deben mantenerse frescos y ser montados de tal forma que el aire fluya libremente alrededor de los mismos [6].

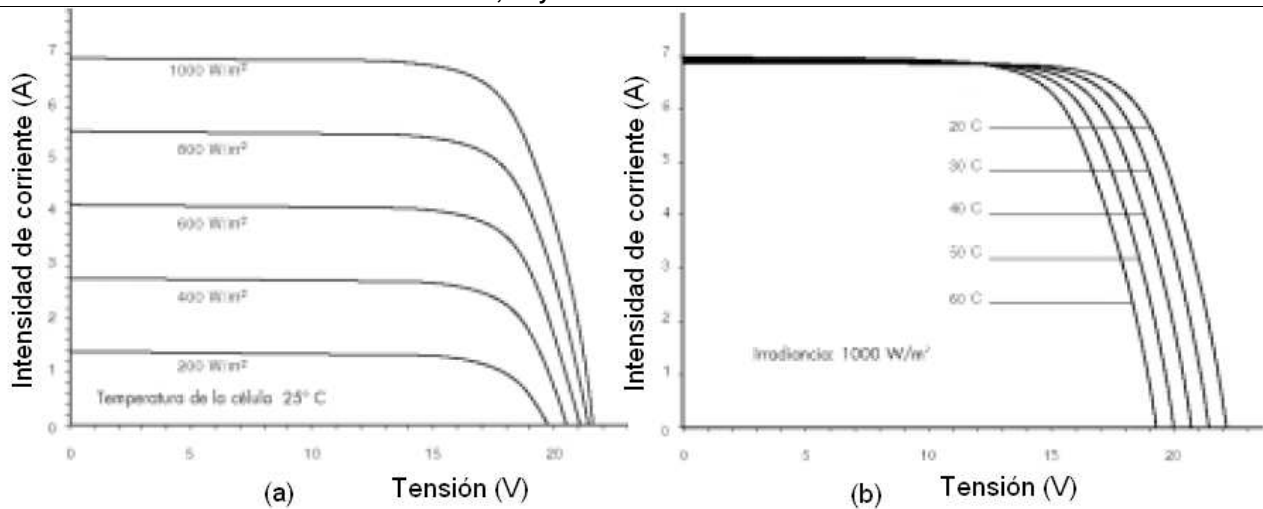


Fig. 2. Variación de la curva característica I-V para diferentes valores de irradiancia (a) y de temperatura (b), de un módulo FV.

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Las curvas y datos obtenidos han sido tomados en situaciones atmosféricas de funcionamiento real del módulo estudiado. En vista de la reciente instalación del mismo, aún no es suficiente la cantidad de datos registrados, estos deberían ser acumulados estadísticamente para una mejor caracterización del mismo y del potencial solar en general.

##### 4.1. Datos experimentales.

- Fecha de medición: 02 de agosto de 2010.
- Tiempo inicial:  $t_0 = 13:30$  Hs.
- Tiempo final:  $t_f = 14:00$  Hs.
- Ángulo  $\alpha$  y Masa de aire (Ec. (1)):  $\alpha = 15^\circ$ ,  $M = 1/\cos \alpha = 1,035$ .
- Latitud del local de la estación solar:  $25^\circ 30'$  sur.
- Inclinación del panel respecto al plano del suelo:  $\beta = 40^\circ$  hacia el norte.
- Temperatura media del panel FV:  $T = 33,5^\circ \text{C}$ .
- Potencia nominal del panel, a  $25^\circ \text{C}$  de temperatura: 48 Wattios.
- Dimensiones y superficie del panel:  $0,31 \text{ m} \times 1,15 \text{ m} = 0,357 \text{ m}^2$ .
- Tipo de panel: de silicio monocristalino.

En la Fig. 3 se observa el espectro de la irradiancia del día, las numerosas depresiones de la curva en horas de la mañana se deben a la nubosidad presente. Los picos más altos sobrepasan 1 SOL de intensidad luminosa, lo cual, para la época del año, indica condición de cielo claro.

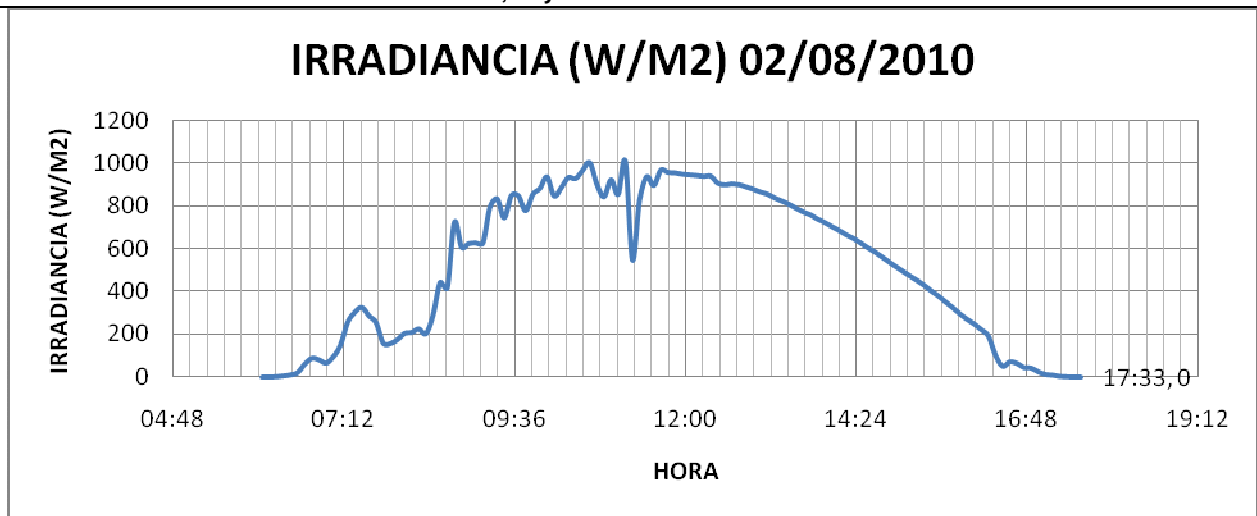


Fig. 3. Distribución de la irradiancia (intensidad luminosa) desde el amanecer hasta el anochecer del día 02-08-2010.

#### 4.1 Curvas I-V y P-V experimentales.

En la Fig. 4 se puede observar la curva característica I-V del panel estudiado. En vista que la duración de las mediciones es de 30 minutos, se ha tenido que promediar el valor de la irradiancia dado que la misma iba declinando lentamente por efecto del paso del tiempo en la tarde.

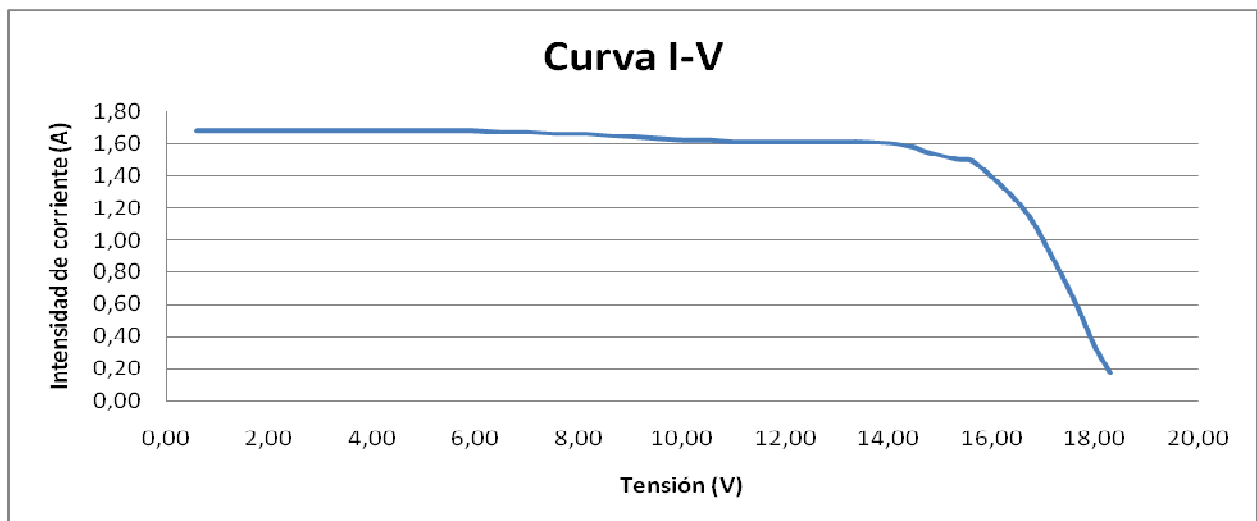


Fig. 4. Curva experimental de la intensidad de corriente versus la tensión (I-V) del panel FV.

En la Fig. 5 se observa la curva experimental de potencia eléctrica versus tensión eléctrica. De esta curva se obtiene el punto de tensión correspondiente a la máxima potencia  $V_{mp} = 15,68$  V. Luego, en la curva I-V (Fig. 4), este valor permite averiguar el punto de corriente correspondiente a la máxima potencia,  $I_{mp} = 1,48$  A. También de esta curva se obtienen los valores de  $I_{sc} = 1,68$  A y de  $V_{oc} = 18,31$  V. Entonces, aplicando la Ec. (2) se obtiene para el factor de forma el valor  $FF = 0,754$

o sea que hay una semejanza aceptablemente aproximada a un rectángulo ( $FF = 1$ ) en la forma de la curva V-I.

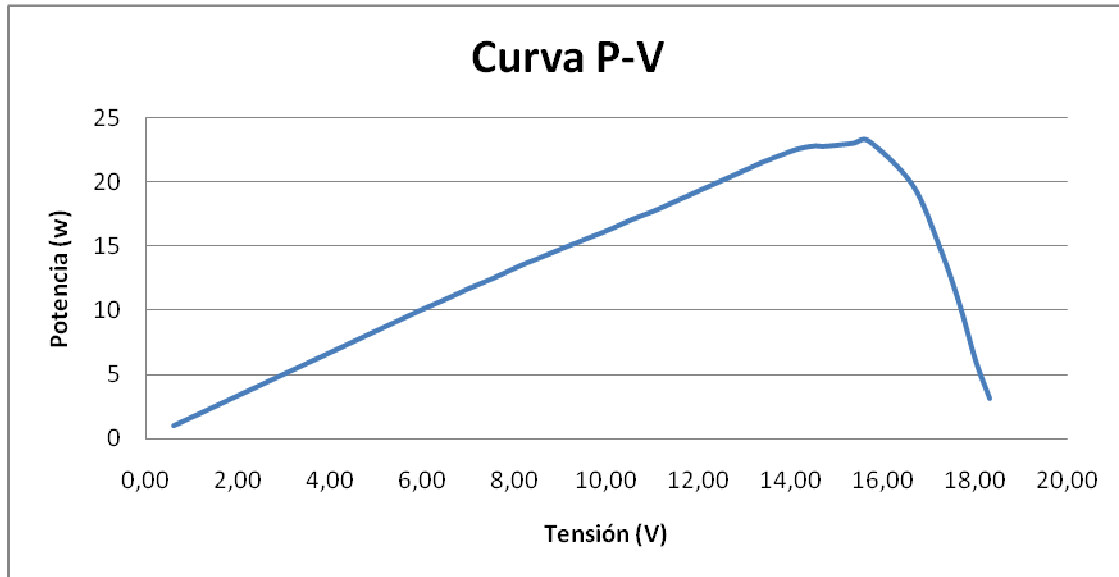


Fig. 5. Curva experimental de la Potencia eléctrica versus la Tensión del panel FV.

Para calcular el valor experimental de la eficiencia, primero se averigua el valor de la irradiancia  $G$  a partir de la curva de la Fig. 3, en realidad se ha promediado el valor correspondiente al intervalo de tiempo entre 13:30 y 14:00 Hs., obteniéndose  $G = 745 \text{ W/m}^2$ . Utilizando el dato de la superficie  $A = 0.357 \text{ m}^2$ , finalmente, con la Ec. (3) se obtiene el valor experimental de la eficiencia,  $\eta = 0,087$ .

## 5 CONCLUSIÓN.

Las curvas y datos obtenidos han sido tomados en situaciones atmosféricas de funcionamiento real del panel, aprovechando la luz del sol como fuente de energía luminosa, se ha tratado de compensar la no constancia de esta fuente de energía eligiendo un intervalo de tiempo en que el cielo permaneció claro, sin nubes, y también en un trayecto del sol cerca del cenit. Las formas de las curvas así obtenidas son las esperadas, de acuerdo a las curvas de referencia encontradas en la literatura técnica. El valor de  $\eta$  encontrado es algo bajo comparado con los valores de referencia para paneles FV monocristalinos. Esto se podría deberse principalmente a la inconstancia de la fuente luminosa, a la obsolescencia del panel FV, al imperfecto enfoque hacia los rayos solares, a la elevada temperatura del mismo, por encima de los  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  de referencia y a imprecisiones en las medidas tomadas.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] [http://www.renewablesb2b.com/ahk\\_peru/es/portal/index/news/show/25fffe7374bbc373](http://www.renewablesb2b.com/ahk_peru/es/portal/index/news/show/25fffe7374bbc373).  
Accedido en Agosto de 2010.
- [2] J. C. Marcel, B. Reuze, CRECER CON ENERGÍA. Vinculando micro empresas y actividades generadoras de ingresos con servicios energéticos para la población en condiciones de pobreza





IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

---

del chaco sudamericano. Guía Energética. Guía para la energización de usos productivos, Transenergie, Marzo de 2007.

- [3] J. M. Arango et al, ``Guía para el Desarrollo de Proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica'', USAID, FIRCO, SNL, SWTDI, vol. 1, Marzo 2001.
- [4] L. H. Vera, ``Programa Computacional para el Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos'', Dissertação de Mestrado, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Junho de 2004.
- [5] H. L. Gasquet, ``Manual Fotovoltaico'', Austin, Texas, 2004
- [6] STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. A Handbook of Recommended Design Practices, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, marzo de 1995.