

# Panel fotovoltaico independiente con concentración mediante lentes de Fresnel

José A. Rodríguez y Esperanza Purón

Laboratorio de Investigaciones en Electrónica del Estado Sólido (LIEES)  
Facultad de Física, Universidad de La Habana

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se describen la construcción y los resultados obtenidos de un panel solar fotovoltaico con concentración luminosa mediante lentes de Fresnel y seguimiento automático de la trayectoria solar, que le permite un funcionamiento independiente de fuentes externas utilizando la propia energía acumulada. Se utilizan 16 lentes plásticas cuadradas de 24 cm de lado y fotoelementos construidos con AlGaAs/GaAs de 10 mm de diámetro y ventana óptica submicrónica. Con una potencia incidente de  $82 \text{ mW/cm}^2$  (AM 1,5) se obtiene una potencia útil de 46,6 W que puede elevarse hasta 65 W utilizando dispositivos de mayor eficiencia.

## ABSTRACT

---

In this work is described the construction and characterization of a photovoltaic module with solar cell concentrator and Fresnel lenses. It has an automatic device attached that moves behind the sun trajectory and it can work without external supply using its own energy.

The module uses sixteen lenses with square geometry with 24 cm on the side and AlGaAs/GaAs solar cells with an ultrathin AlGaAs window layer design. The diameter of the cells is 10 mm. Concentrators obtained have 46,6 W of output power corresponding to power input of 82 mW/cm<sup>2</sup> (AM 1.5) and its output power can be as high as 65 W when it is used with selected cells.

## INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos en el diseño, obtención y estudio de fotoelementos basados en estructuras de AlGaAs/GaAs, que ofrecen altas eficiencias a elevadas concentraciones luminosas (1)-(3), así como en su utilización en módulos solares fotovoltaicos de limitada potencia nominal que concentran la radiación y siguen la trayectoria solar (4)-(6), han estimulado el ulterior desarrollo de los trabajos de investigación en esta línea.

En este trabajo se presentan la construcción y los resultados de un panel fotovoltaico en el cual se conectan en serie 16 fotoelementos de 10 mm de diámetro sobre los que se concentra la radiación solar por medio de 16 lentes de Fresnel correspondientes. El panel está dotado de un sistema propio de concentración y seguimiento automático del sol lo que le permite brindar una potencia útil máxima durante todo el tiempo que dure la insolación directa. Además, este sistema de orientación es alimentado por la propia energía generada y acumulada en el sistema, lo cual le brinda absoluta autonomía de funcionamiento.

## CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Consta de un panel cuadrado de Al de 98 cm de lado en cuya cara anterior se ubican las lentes de Fresnel, cuyas características aparecen reportadas en (6). Ellos son sostenidos por medio de finas láminas metálicas que le brindan rigidez al conjunto y a la vez disminuyen la distancia entre lente y lente a 1 mm, con lo cual se logra un máximo aprovechamiento de la radiación luminosa que recibe el conjunto (figura 1).

Los fotoelementos se sueldan a sus soportes para lograr un mejor intercambio térmico y estos se atornillan a la parte posterior del panel asegurando un buen contacto entre las dos superficies, con el mismo objetivo. De esta forma la propia estructura metálica del sistema sirve como elemento disipador de calor, asegurando que la temperatura del fotoelemento no supere los 80°C con lo cual no hay afectación sensible en su eficiencia (7).

El panel a su vez va montado en una base provista de tres ruedas cuya disposición forma un triángulo isósceles. Una de estas ruedas es motriz y permite un giro de todo el conjunto en un eje vertical. La articulación a la base se realiza en dos puntos con chumaceras y esto permite el giro en torno a un eje horizontal. Ese giro es controlado por un segundo sistema motor. Ambos motores se alimentan con un banco de 10 acumuladores de Ni-Cd

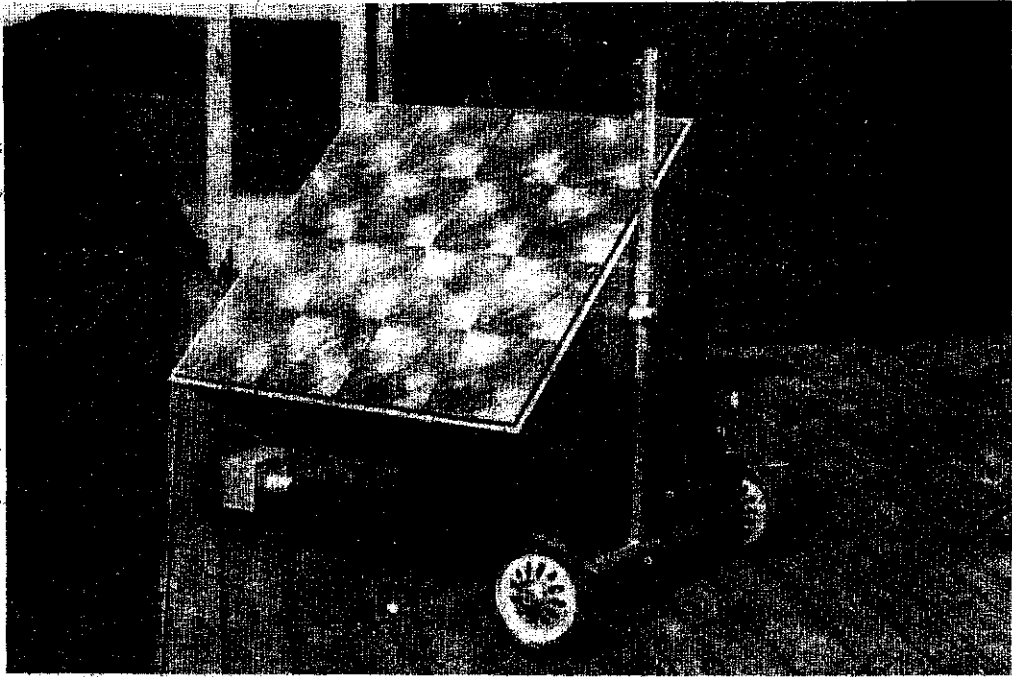


Figura 1. Vista real del panel solar fotovoltaico.

(12 V en total) que constituye a la vez el sistema de acumulación de energía del panel. En la parte superior de este se ubica un doble sensor luminoso dotado de celdas fotovoltaicas de Si, que percibe el movimiento del sol y envía, cada 15 segundos aproximadamente una señal a un circuito electrónico, el cual a su vez ordena el movimiento de los motores para lograr la corrección de la posición del sistema. De esta manera se asegura que durante todo el día la dirección perpendicular a la superficie anterior del panel coincida con la dirección de los rayos solares y con ella la mancha luminosa producida por las lentes, permanezca siempre sobre los fotoelementos correspondientes.

El circuito eléctrico general del panel aparece en la figura 2, donde se aprecia la conexión en serie de los fotoelementos. Además, cada grupo de tres de estos dispositivos, está conectado a un diodo de silicio de potencia, en paralelo y con polaridad contraria.

Si en alguno de estos fragmentos de circuito existen fotoelementos con pésimas características, por ejemplo, elevados valores de resistencia en serie, la caída de voltaje correspondiente, da lugar a una rápida disminución de la corriente total, producto de la corriente de oscuridad en directa, que es de sentido contrario a la fotocorriente. Sin embargo, la propia caída de voltaje polariza en directa a nuestro diodo de silicio, con lo cual se asegura la conducción a través de él y la estabilización correspondiente del valor de la corriente total (ver figura 5).

## CARACTERÍSTICAS Y MONTAJE DE LOS FOTOELEMENTOS

Se utilizan fotoelementos de geometría circular y 10 mm de diámetro contruidos con la estructura p-Al<sub>0,8</sub>Ga<sub>0,2</sub>As/p-GaAs/n-GaAs con ventana óptica submicrónica. [Los detalles de la obtención y estructura de estos dispositivos pueden consultarse en la referencia (6), en la cual además se reporta el montaje de estos en los soportes metálicos de cobre]. Dado que fueron conectados en serie, además de asegurar el buen contacto térmico entre los fotoelementos y sus bases, se debió garantizar su aislamiento eléctrico, lo que se consiguió interponiendo una fina lámina de Si con difusiones por ambas caras, como se reporta en (6).

En la figura 3 se muestran las características I-V iluminadas, con diferentes niveles de iluminación, de un fotoelemento de estas mismas características aunque de 7 mm de diámetro. La luz fue concentrada en este experimento por medio de un espejo esférico y se utilizó agua circulante para evacuar el calor generado.

Se reportan, además, los valores del factor de concentración (K), factor de llenado (FF) y eficiencia efectiva ( $\eta_{ef}$ ). Como se aprecia, con estos dispositivos se pueden obtener elevadas eficiencias bajo elevados factores de concentración luminosa.

La selección de la distancia entre la lente y el fotoelemento correspondiente, la cual resulta fija en el panel, se realizó siguiendo el criterio de obtener la máxima potencia útil a la salida. Para ello se realizó un estudio de cómo varía dicha magnitud en función de la distancia a la lente, lo cual se muestra en la figura 4. En la propia figura aparece el comportamiento correspondiente de la corriente en cortocircuito. Como se observa, la potencia máxima de salida ocurre para una distancia de 335 mm, valor este que fue tomado en cuenta a la hora de determinar la profundidad del panel de aluminio. Es interesante destacar que, como se aprecia en la misma figura 4, esta situación no corresponde al mayor valor de corriente de cortocircuito, que ocurre cuando la mancha luminosa cae completamente sobre el fotoelemento.

La razón de esta aparente contradicción es que la resistencia en serie del dispositivo, que es responsable de importantes pérdidas de potencia. cuando se trabaja bajo concentración luminosa, depende fuertemente de la distribución de radiación sobre toda el área activa (perfil de iluminación) en virtud de su carácter distribuido (8)-(9), y la distribución óptima no tiene necesariamente que ser la correspondiente a la máxima corriente. El enfoque final de la mancha luminosa sobre cada fotoelemento se realizó tapando las lentes con cuadrados de cartón provistos de un agujero en su centro, que coincide con uno similar abierto en el centro de aquellos. Por este agujero pasa un rayo de luz que va al fondo del panel, formando una mancha sobre la cual se ubica el centro del dispositivo.

## RESULTADOS PRELIMINARES Y CONCLUSIONES

Las curvas I-V iluminadas de todo el panel se muestran en la figura 5. Las mediciones se realizaron primeramente con los 16 fotoelementos conectados, después se eliminaron 5 de las peores características y se obtuvo nuevamente la curva I-V, finalmente se repitió el proceso eliminando la mitad de dispositivos y dejando los de mejores cualidades. En la propia figura se reportan los valores de potencia incidente (p. inc.), potencia útil entregada (P. útil) y eficiencia ( $\eta$ ), para los tres casos señalados.

Las eficiencias fueron calculadas dividiendo la potencia total entregada entre la potencia recibida en el área total de las lentes empleadas en cada caso. Se observa en todos los casos, el efecto del funcionamiento de los diodos de Si, ya que la corriente disminuye al principio para luego estabilizarse.

Como se observa, la eficiencia total del sistema aumenta al eliminar la conexión de los dispositivos de parámetros más deficientes. En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos en el mejor de los fotoelementos utilizados al ser iluminado por su lente correspondiente. Aparece la curva iluminada, la potencia incidente, la potencia útil y la eficiencia de este sector del panel ( $\eta_{sec}$ ) (sector nr. 14). Se obtiene una potencia útil de 4,1 W y una eficiencia de 8,5%. Esto indica que si todos los fotoelementos usados hubieran sido como este, la potencia total del sistema hubiera sido de 65 W, considerando despreciables las pérdidas en el circuito, en virtud de que las corrientes no son muy elevadas por tratarse de una conexión en serie.

El factor que más influye en las bajas eficiencias obtenidas en estos sistemas de concentración mediante lentes de Fresnel es, aparte de la intrínsecamente limitada eficiencia de los fotoelementos, la baja eficiencia de la propia lente como sistema concentrador. Como se reportó en (6) la relación entre el factor de concentración real y el correspondiente factor de concentración geométrica para estas lentes es de 0,44. Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos que utilizan estos dispositivos como elementos concentradores resultan mucho más sencillos al eliminar la utilización de radiadores adicionales para la eliminación del calor, como ocurre en el caso de los espejos esféricos reflectores (4)-(5).

Aparte de la necesidad de realizar un estudio sobre la durabilidad, correlación entre energía consumida y entregada en condiciones reales y costo por Watt de potencia en condiciones de producción en serie, el presente trabajo demuestra la posibilidad de transformación fotovoltaica de la luz solar, en condiciones de absoluta autonomía, lo que resulta de sumo interés por sus posibles aplicaciones en las condiciones que prevalecen en algunas regiones y actividades de nuestro país.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco de la colaboración entre nuestra Institución y el Laboratorio de Fenómenos de Contacto del Instituto Físico Técnico Ioffe de la A. C. de la URSS en Leningrado, dirigido por el Académico Zh. I. Alferov, a quien, como al resto de su colectivo deseamos expresarle nuestro más profundo agradecimiento.

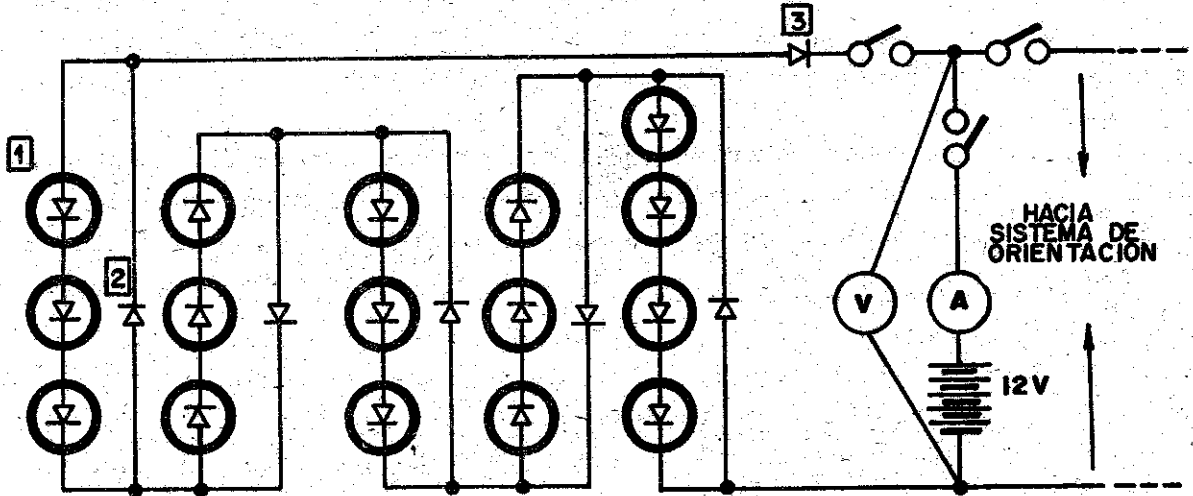
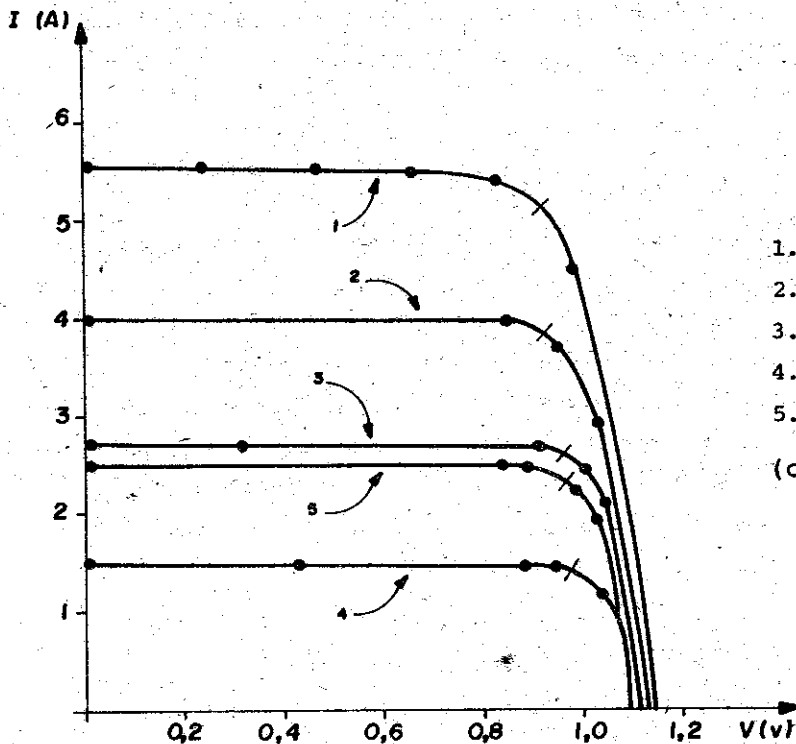


Figura 2. Circuito eléctrico del panel.

1. fotoelemento
2. diodo de Si
3. diodo de Si para evitar descarga del acumulador.



1.	K = 982	FF = 0,76	$\eta_{ef} = 19,0 \%$
2.	K = 708	FF = 0,81	$\eta_{ef} = 20,3 \%$
3.	K = 478	FF = 0,84	$\eta_{ef} = 20,9 \%$
4.	K = 265	FF = 0,85	$\eta_{ef} = 21,4 \%$
5.	K = 88	FF = 0,855	$\eta_{ef} = 20,9 \%$

(corresponde a  $I_{cc} = 0,5 \text{ A}$ )

Figura 3. Característica I-V iluminadas de un fotoelemento de 1 mm con la estructura descrita.

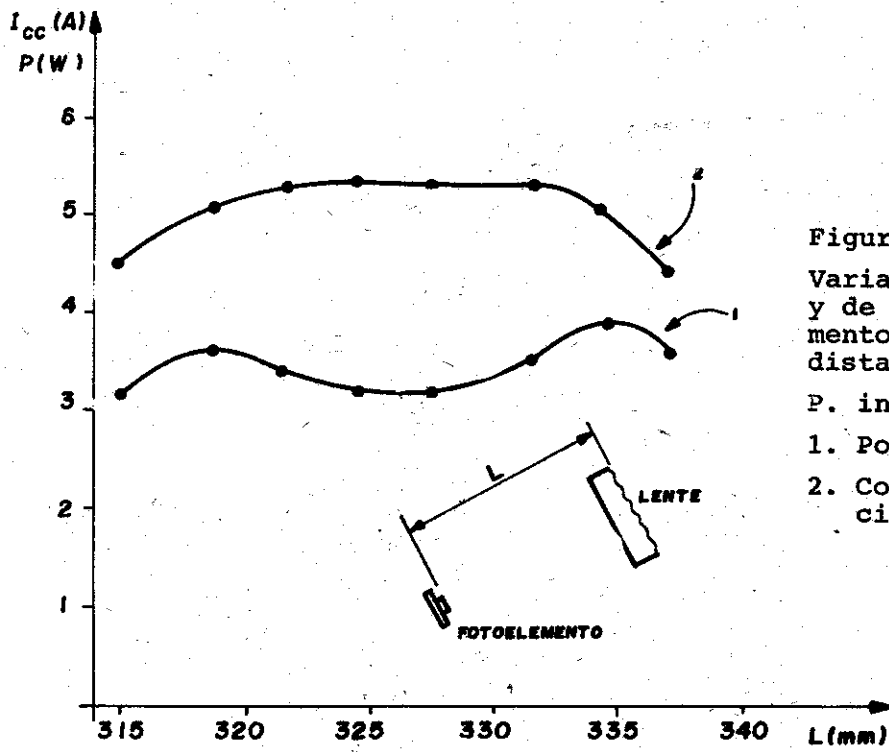


Figura 4.

Variación de la potencia y de  $I_{cc}$  de un fotoelemento de 10 mm con la distancia a la lente.

$P. inc. = 77 \text{ mW/cm}^2$

1. Potencia

2. Corriente de cortocircuito.

Figura 5.

Características I-V de todo el panel. Factor de concentración

$K = 400$

1. (con 16 fotoelementos)

$P. inc. = 82 \text{ mW/cm}^2$

$P. \acute{u}til = 46.6 \text{ W}$

$\eta = 6,2 \%$

2. (con 13 fotoelementos)

$P. inc. = 81,5 \text{ mW/cm}^2$

$P. \acute{u}til = 42,6 \text{ W}$

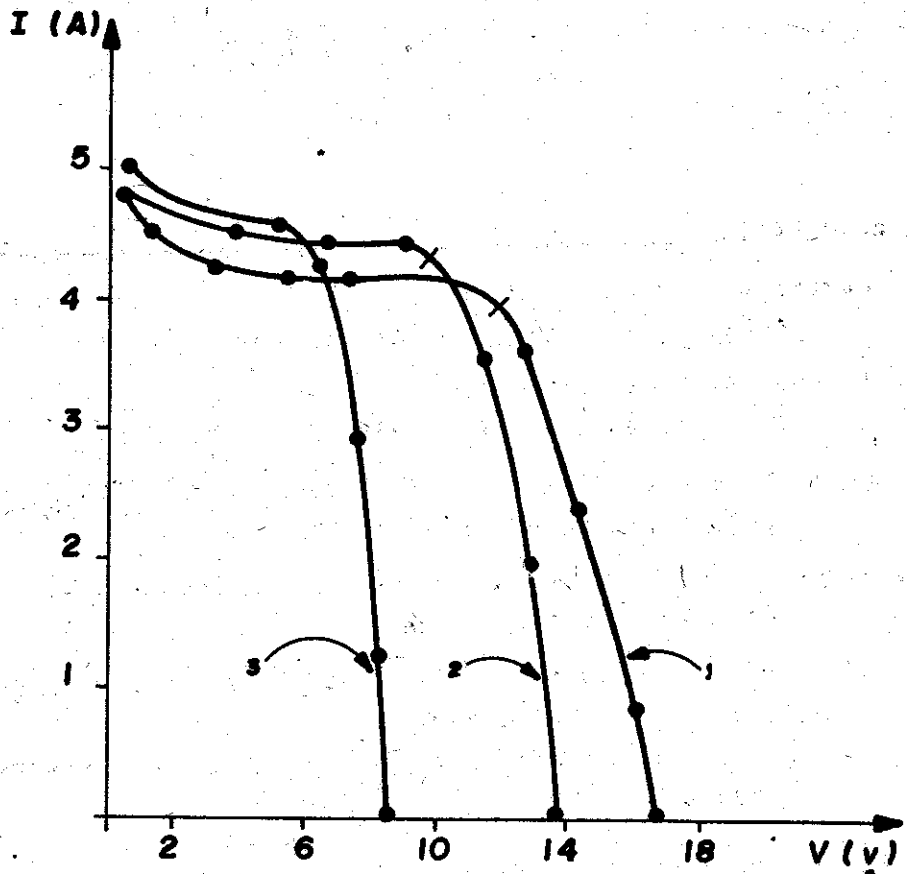
$\eta = 7,0 \%$

3. (con 8 fotoelementos)

$P. inc. = 79,0 \text{ mW/cm}^2$

$P. \acute{u}til = 26,7 \text{ W}$

$\eta = 7,3 \%$



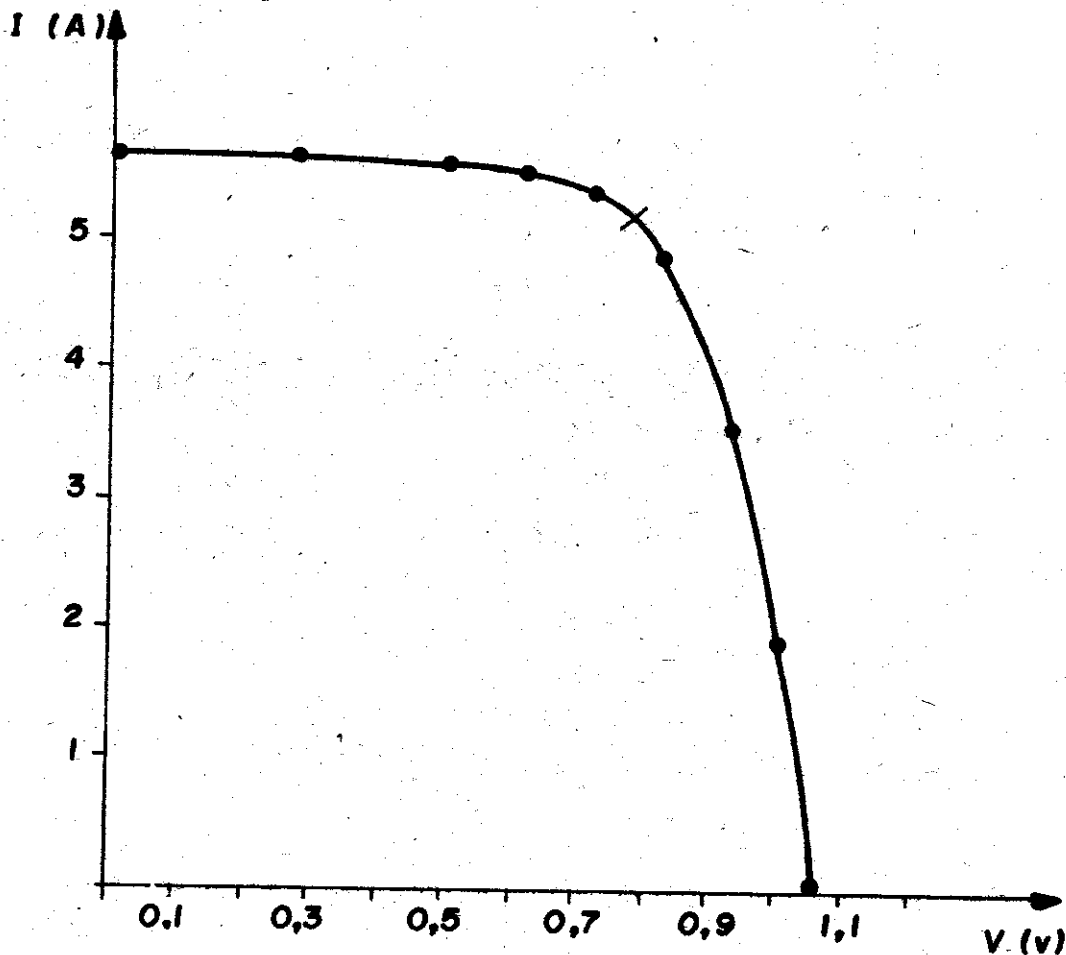


Figura 6. Características I-V iluminada del sector nr. 14  
 P. inc. = 83,5 mW/cm<sup>2</sup>  
 P. útil = 4,1 W  
 η = 8,5 %

#### BIBLIOGRAFÍA

1. James, L.W. and R.L. Moon  
 Appl. Phys. Lett., 26, 467 (1975).
2. Saxena, R.R. et al.  
 J. Appl. Phys. 51(8). 1980.
3. Sahai, R.; D.P. Edwall and J.S. Harris, Jr.  
 Appl. Phys. Lett., 34, 147 (1979).
4. Alferov, Zh. I.; J.K. Aripov, V.D. Rumiantsev y V.R. Larionov  
 Heliotecnica, 6, 3, (1981).
5. Díaz, P.; L. Hernández; L. Picazo; T. Prutskij; E. Purón; F. Ramos;  
 J. Rodríguez y V. Rumiantsev  
 Memoria de la III Jornada Científica del ININTEF, ACC, pp. 317,  
 (1982).



6. Rodríguez, J.A. y E. Purón

Revista Cubana de Física (Vol.VIII, No.1, 1988).

7. Hovel, H.J.

Semiconductors and semimetals, V. 12, Solar Cells, cap. 8, pp. 173.

8. Luque, A.; E. Lorenzo and M. Ruiz

Solar Energy, 25, 2, (1980).

9. Lorenzo, E.; E. Sánchez and A. Luque

J. Appl. Phys. 52(1). (1981).

Recibido: 15 de septiembre de 1985.