

# Módulos fotovoltaicos con concentración de la radiación 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

---

Se reportan la construcción y estudio de dos módulos fotovoltaicos con concentración de la radiación utilizando lentes de Fresnel. Los módulos emplean cuatro fotoelementos basados en la estructura p-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs con ventana óptica submicrónica de 7 y 10 mm de diámetro, conectadas en serie y en paralelo. Las lentes son cuadradas de 24 cm de lado, análogas a las empleadas en equipos de retroproyección. Se obtienen potencias útiles de 15.8 y 14.1 W, con radiación incidente de 72.2 y 74.7 mW/cm<sup>2</sup> (AM 1,5) en los módulos en serie y en paralelo respectivamente.

## ABSTRACT

---

In this work is described the construction of two photovoltaic modules with solar cell concentrator and Fresnel lenses. These modules use four p-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs solar cells with an ultrathin AlGaAs window layer design. The diameter of the devices are 7 and 10 mm and were connected in series and parallel modes. The lenses have square geometry with 24 cm on the side. Concentrators obtained have 15.8 and 14.1 W of output power corresponding to power inputs of 72.2 and 74.7 mW/cm<sup>2</sup> (AM 1.5) when connected in series and parallel modes respectively.

## I. INTRODUCCIÓN

---

En los últimos años se han alcanzado éxitos notables en el diseño y construcción de fotoelementos basados en la heterojuntura AlGaAs/GaAs, obteniéndose valores elevados de eficiencia con altos factores de concentración

luminosa (1)-(5). Estos resultados han sido obtenidos tanto, siguiendo la tecnología de ventana óptica ancha, como estrecha o submicrónica. Este hecho ha permitido la construcción y explotación experimental de módulos fotovoltaicos con concentración de la radiación luminosa y seguimiento del sol (6) - (7), en los cuales el costo por watt de potencia útil viene determinado, más que por los propios fotoelementos, por el resto de la instalación.

Para lograr altas concentraciones luminosas se han seguido diferentes métodos, fundamentalmente la reflexión en superficies esféricas, cilíndricas o parabólicas y la refracción en lentes de diversos tipos.

En el presente trabajo se reportan la construcción y los resultados obtenidos, de dos pequeños módulos fotovoltaicos con concentración luminosa mediante cuatro lentes de Fresnel fabricadas de material plástico, empleando fotoelementos circulares de 7 y 10 mm de diámetro con la estructura p-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs y ventana óptica submicrónica. En las secciones II y III se describen la construcción de los módulos y de los fotoelementos que fueron obtenidos utilizando el método de epitaxia desde la fase líquida con enfriamiento forzado. En la sección IV se reportan y analizan los resultados obtenidos.

Este trabajo constituyó una primera etapa para el desarrollo ulterior de paneles solares de este tipo con potencias cercanas a los 100 W.

## II. CONSTRUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS

Ambos módulos están formados por un cuerpo de aluminio cerrado, excepto en la cara anterior, en la cual se ubican las cuatro lentes de Fresnel (fig.1), Los cuatro fotoelementos correspondientes van montados en sus soportes y estos a su vez van atornillados directamente a la cara posterior del cuerpo metálico, en los lugares donde se forman las manchas luminosas producidas por las lentes. El contacto metálico íntimo entre los soportes y el cuerpo permite que este último actúe como elemento disipador del calor. Ambos módulos se fijan a un panel que posee un movimiento manual para regular la altura de la trayectoria solar según la época del año en que se trabaje y un movimiento producido por un motor de alimentación externa que permite seguir el sol durante todo el día. La conexión de los fotoelementos es en serie en un caso, y en paralelo en el otro.

Las lentes son cuadradas de 24 cm de lado y van fijas al cuerpo del módulo por medio de cuatro tornillos que atraviesan sendos muelles lo que les permite regular la distancia al fotoelemento dentro de cierto rango, buscando la máxima potencia útil. Previamente se determinó que para un dispositivo de 10 mm de diámetro, dicho valor máximo ocurre cuando la distancia de éste a la lente es de 335 mm (Fig.2). Se verificó, además que la mancha luminosa es de tales dimensiones, que pueden utilizarse fotoelementos de

1 mm de diámetro sin afectar la potencia útil entregada lo que redundaría en un ahorro del material empleado.

Otro aspecto de interés respecto a las lentes lo constituye su fuerte aberración cromática que debió tenerse en cuenta a la hora de realizar el enfoque inicial procurando que cayera dentro del área del dispositivo, la región del espectro correspondiente a la respuesta espectral del mismo.

Por último se realizó un estudio de las características I-V iluminadas de uno de los cuatro sectores del módulo en paralelo (fotoelemento de 7 mm de diámetro) dejando pasar la luz solamente por orificios circulares concéntricos con la lente, de diferentes diámetros.

En la fig. 3 se muestran las curvas obtenidas. En la misma se señala el diámetro del orificio abierto, en cada caso. Se reportan, para cada curva, el factor de concentración (K), el factor de llenado (FF), la eficiencia del fotoelemento ( $\eta_{\text{fot}}$ ), la eficiencia del sector formado por este y la lente ( $\eta_{\text{sec}}$ ) y la potencia útil entregada (P útil).

Se determinó la relación entre el factor de concentración real medido y el correspondiente factor geométrico, para todos los casos indicados en la figura, observándose que esta relación aumenta al utilizar regiones más cercanas al centro (43.6, 48.6, 54.6 y 55.2% para los casos mostrados) lo que indica que la calidad de la lente como sistema concentrador, aunque en general no es buena, aumenta hacia esa región.

### III. OBTENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS FOTOELEMENTOS

Como se indicó anteriormente se emplearon fotoelementos obtenidos sobre la base de la heterojuntura AlGaAs/GaAs donde la ventana óptica de AlGaAs poseía un espesor menor de 1  $\mu\text{m}$ . La Fig. 4 muestra un esquema de la estructura utilizada en la fabricación de estos dispositivos. Sobre un sustrato de n-GaAs(Sn) (100) con concentración  $n = 1.3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  se crece, por epitaxia desde la fase líquida, una capa buffer de n-GaAs(Sn) con concentración  $n \approx 0.5 - 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . A continuación, en un proceso independiente, se crece una fina capa de p-AlGaAs(Zn) proceso en el cual ocurre la difusión del Zn desde la fase líquida formando la juntura p-n en la capa buffer. Mediante un ataque posterior, se reduce el espesor de la ventana hasta obtener menos de 1  $\mu\text{m}$ . Esto permite la obtención de una respuesta espectral ancha, pero a la vez aumenta la resistencia laminar lo que obliga a emplear, como contacto anterior, una fina rejilla con un 20-25% de sombreado. La optimización de estos factores permite obtener valores de eficiencia tan elevados como 21.6% a 175 soles (Fig.3).

El contacto anterior se define por medio de la técnica fotolitográfica, luego de lo cual se realiza un ataque selectivo para eliminar la capa de AlGaAs y realizar el contacto al GaAs directamente. Se realiza una deposición de Au(Sn) a la zona p y de Au(Ge) a la zona n (contacto posterior), a

continuación se deposita electrolíticamente una capa fina de Ni y se realiza un tratamiento térmico a 440 °C durante tres minutos en atmósfera de H<sub>2</sub> puro. Un depósito ulterior de Ni electrolítico con un llenado final de las canales con una aleación de Pb y Sn (60% en peso de este último) dejan finalmente listo el dispositivo.

Estos fueron soldados directamente a los soportes de cobre interponiendo entre ambos una fina lámina de molibdeno a fin de evitar el cambio brusco entre los coeficientes de dilatación del semiconductor y el Cu, que tiende a quebrar la estructura durante los cambios de temperatura. En el caso de fotoelementos de 10 mm, que fueron conectados en serie, se debió además, aislar estos eléctricamente de los cuerpos, que son fijados directamente a la estructura metálica. Para ello se interpuso, además de la lámina de Mo, una fina lámina de Si a la cual se le realizaron difusiones por ambas caras y se le cortaron los bordes. Se debió anteponer también, una lámina de Cu para servir de contacto posterior.

#### IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

Las figuras 5 y 6 muestran las características I-V iluminadas de los módulos en paralelo y en serie, respectivamente, y los valores de potencia útil y eficiencia obtenidos. Estos últimos fueron calculados dividiendo simplemente la potencia máxima obtenida entre la potencia total incidente en el área de recolección del módulo. Como se observa, la eficiencia con la conexión en paralelo resulta de un 8.5% contra un 9.8% del módulo en serie. Sin embargo, la eficiencia del sector que posea el mejor fotoelemento, en el primero de estos módulos (Fig.3), fue de 9.5%, por lo cual la diferencia de resultados entre ambos debe ser atribuida a la calidad de los restantes fotoelementos como aspecto determinante. Además, al conectar los dispositivos en paralelo, se obtienen elevados valores de corriente (más de 18 A) por lo cual pueden aparecer pérdidas en todo el circuito externo de medición. Esto lo reafirma el hecho de que, con una potencia incidente de 74.7 mW/cm<sup>2</sup>, las potencias útiles entregadas por los cuatro sectores del módulo en paralelo, medidas individualmente, fueron de 3.55, 4.1, 3.7 y 3.3 W lo que suman 14.7 W contra 14.1 W obtenido al medir el sistema en su conjunto.

Por otro lado, la eficiencia de 9.5% obtenida por el sector más eficiente del módulo en paralelo, que usa fotoelementos de 7 mm, reafirma el criterio inicial de que, debido al enfoque producido por las lentes, puede utilizarse este valor para el diámetro del dispositivo en estos sistemas, lo que contribuye a disminuir el costo de producción.

Los bajos valores de eficiencia obtenidos en estos sistemas, están influidos por las eficiencias propias de las celdas fotovoltaicas y por el bajo rendimiento de las lentes como dispositivos concentradores.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al convenio de colaboración entre nuestra Institución y el Laboratorio de Fenómenos de Contacto del Instituto Físico Técnico Ioffe de Leningrado, dirigido por el Académico I. Alferov, a quien, como al resto de su colectivo, expresamos nuestro más profundo agradecimiento.

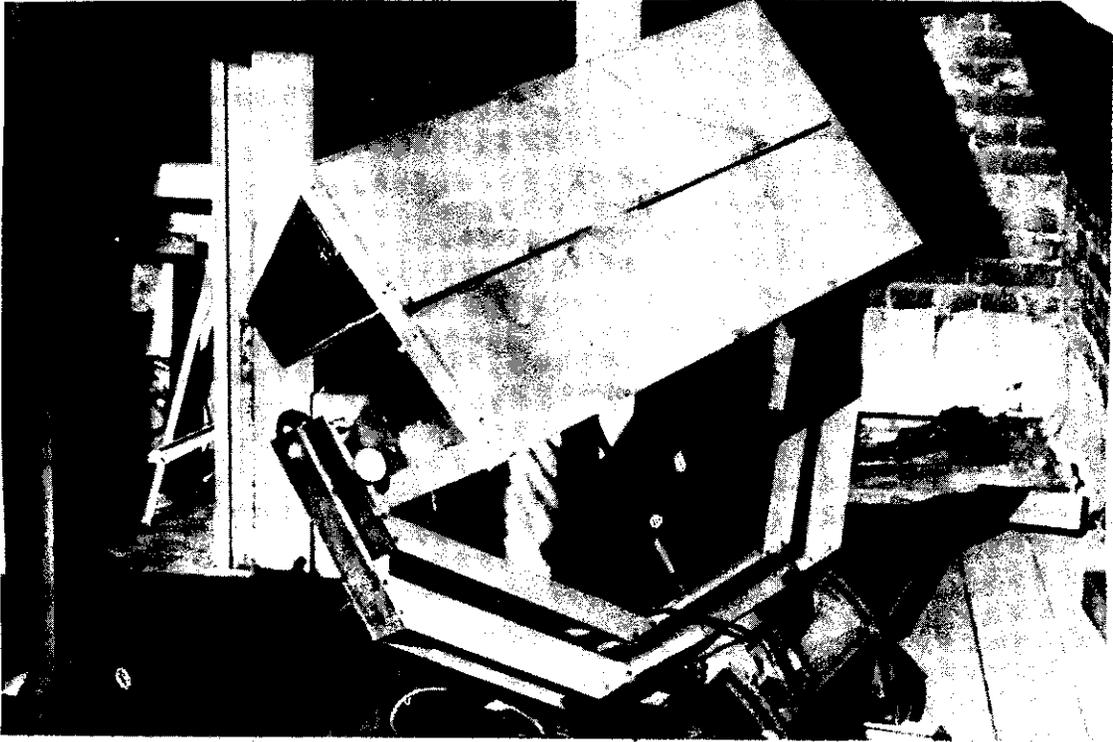


Figura 1. Vista real de los módulos fotovoltaicos montados en un mismo sistema de orientación.

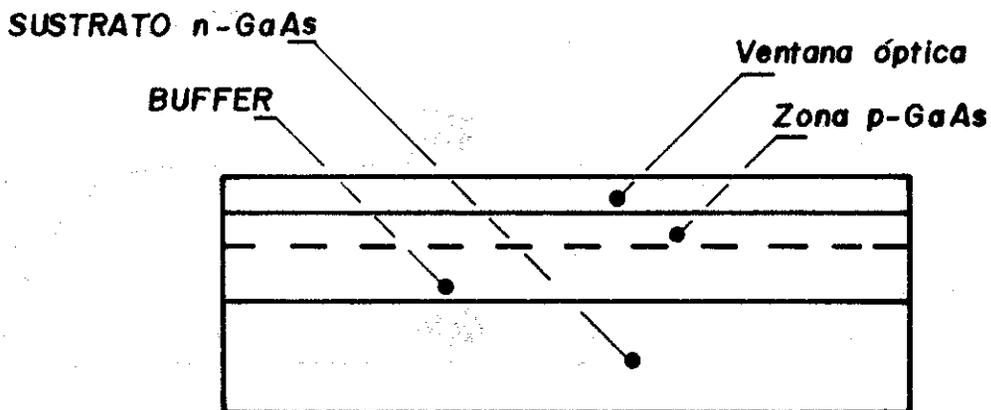


Figura 2. Estructura de los fotoelementos

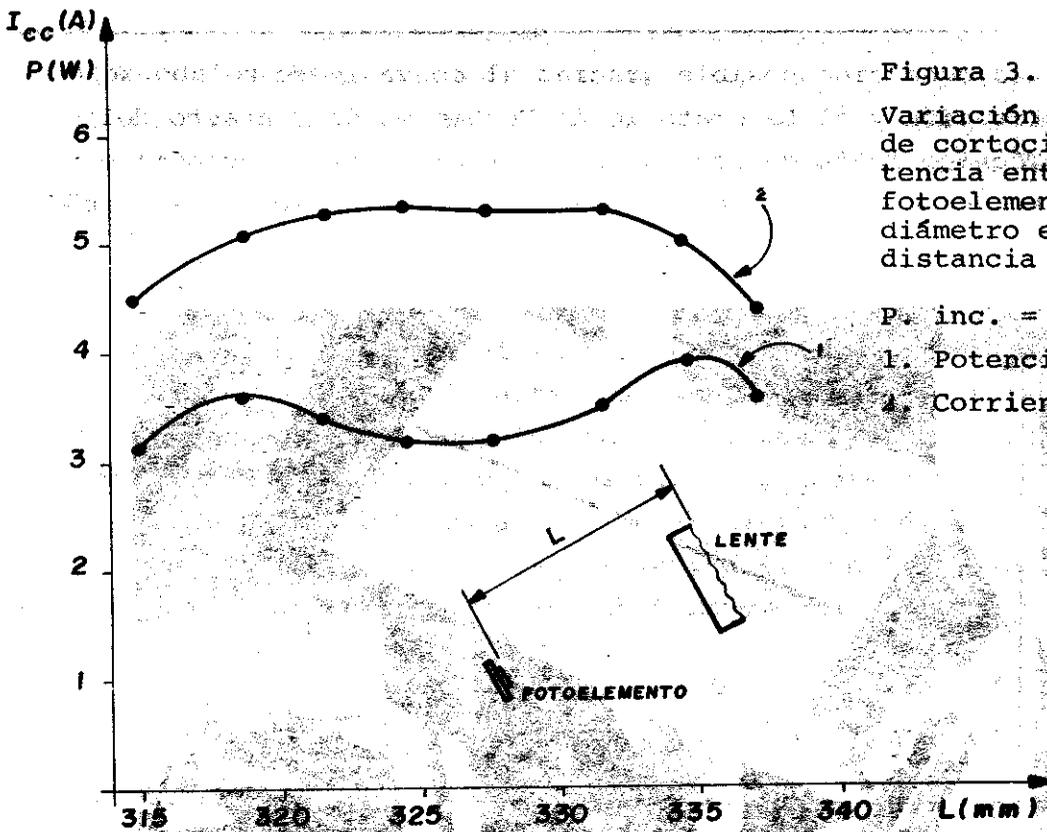


Figura 3.  
Variación de la corriente de cortocircuito y la potencia entregada por un fotoelemento de 1.0 cm de diámetro en función de su distancia a la lente.

$P_{inc.} = 77 \text{ mW/cm}^2$   
1. Potencia  
2. Corriente

Figura 4.

Características I-V iluminadas de un sector del módulo en paralelo tapando diferentes zonas de la lente.

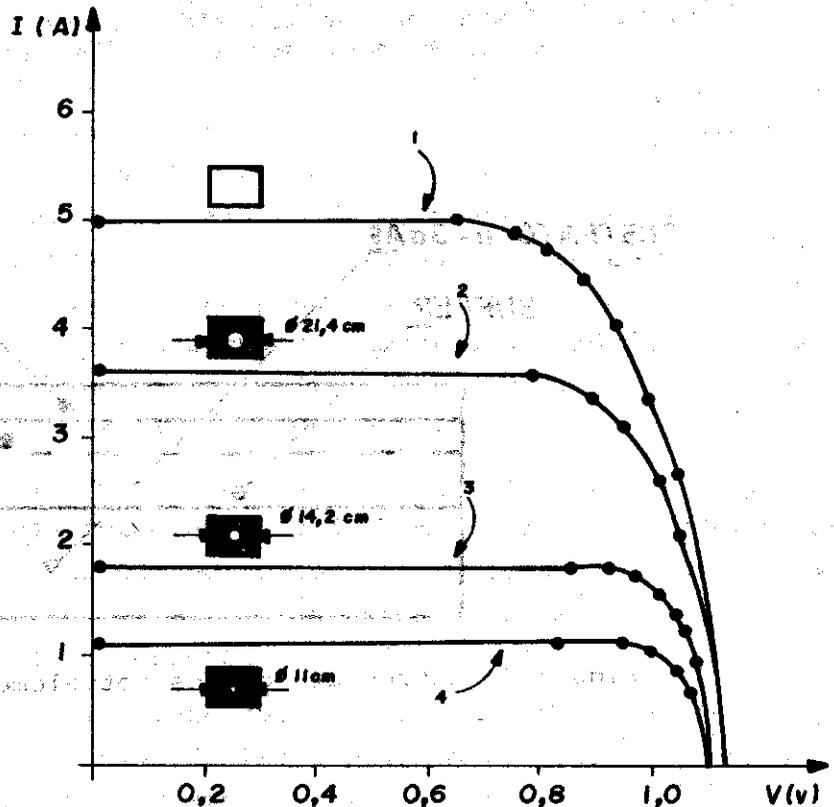
$P_{inc.} = 75.1 \text{ mW/cm}^2$

1.  $K=810$ ,  $FF=0.69$ ,  $\eta_{fot} = 14.3\%$ ,  $\eta_{sec} = 9.5\%$ ,  
 $P_{\text{útil}} = 3.97 \text{ W}$

2.  $K=583$ ,  $FF=0.76$ ,  $\eta_{fot} = 19.0\%$ ,  $\eta_{sec} = 11.5\%$ ,  
 $P_{\text{útil}} = 3.10 \text{ W}$

3.  $K=288$ ,  $FF=0.82$ ,  $\eta_{fot} = 20.2\%$ ,  $\eta_{sec} = 14.0\%$ ,  
 $P_{\text{útil}} = 1.67 \text{ W}$

4.  $K=175$ ,  $FF=0.87$ ,  $\eta_{fot} = 21.6\%$ ,  $\eta_{sec} = 14.7\%$ ,  
 $P_{\text{útil}} = 1.05 \text{ W}$



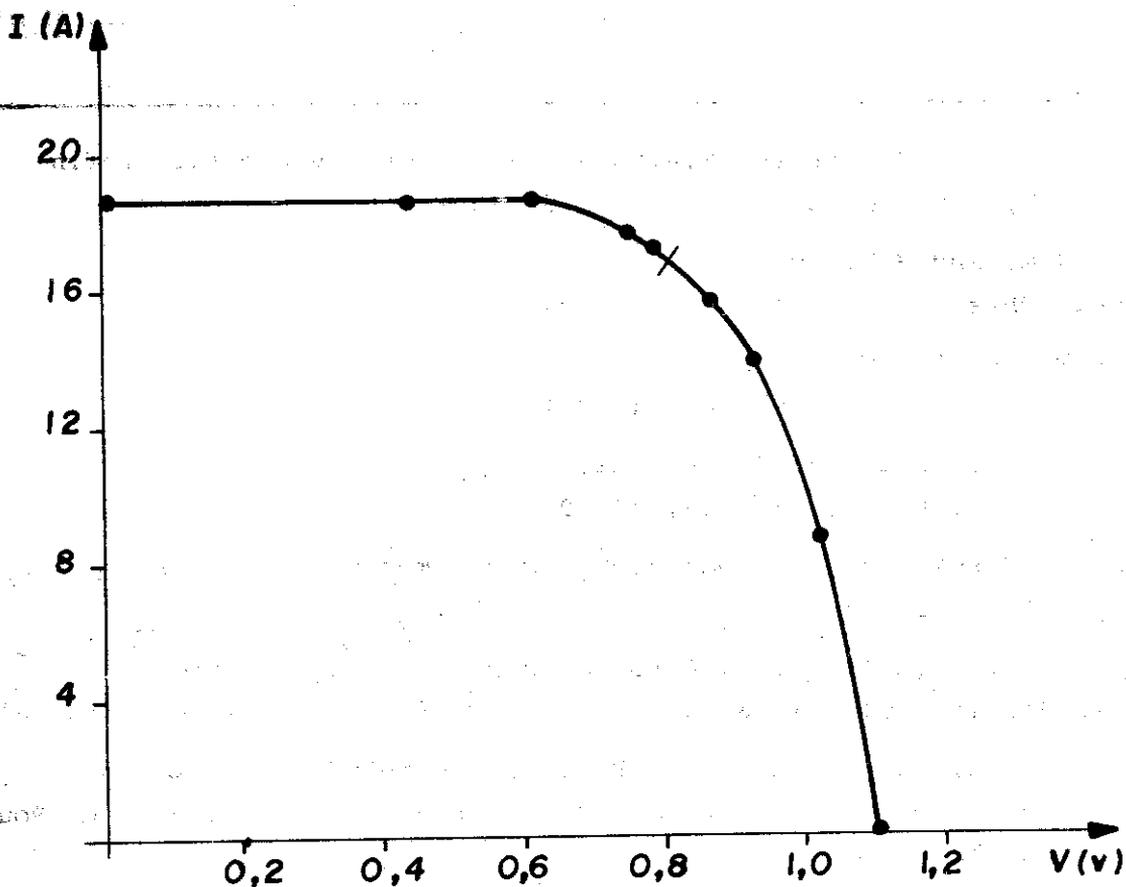


Figura 5. Características I-V iluminada del módulo en paralelo.  
 P. inc. = 74.7 mW/cm<sup>2</sup>      P. útil = 14.1 W  
 η mod = 8.5%

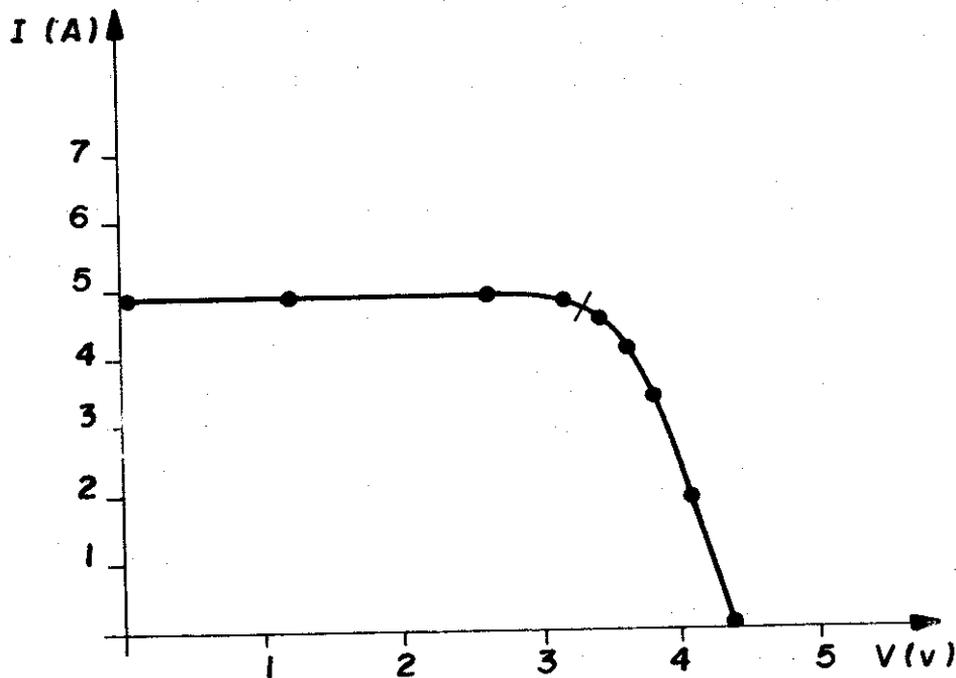


Figura 6. Característica I-V iluminada del módulo en serie.  
 P. inc. = 72.2 mW/cm<sup>2</sup>      P. útil = 15.8 W  
 η mod = 9.8%

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Alferov, Zh.I.; V.M.Andreev; M.B.Kagan; I.I.Protasov and V.G.Trofin  
Sov. Phys. Semicond., 4, 2047, (1971).
2. Woodall, J.M. and H.H.Hovel  
Appl. Phys. Lett., 21, 379, (1972).
3. James, L.W. and R.L.Moon  
Appl. Phys. Lett., 26, 467, (1975).
4. Sahai, R.; O.P.Edwall and J.S.Harris, Jr  
Appl. Phys. Lett., 34, 147, (1979).
5. Díaz, P.; L.Hernández; J.A.Rodríguez and R.Romero  
Crystal Res. & Technol., 17, 1025, (1982).
6. Alferov, I.Zh.; J.K.Aripov, V.D.Rumiantsev y V.R. Larionov  
Heliotecnica, 6, 3 (1981).
7. Borges, F.; C.Cimino; J.Chiroldi; P.Díaz; L.Hernández; C.Picaso;  
J.Picans; T.Prutskij; E.Purón; J.A.Rodríguez; R.Romero; S. de Roux  
y E. Sánchez;  
4ta. Conferencia Científica, UH, enero 1984.

Recibido: 5 de junio de 1986.