

Revisión de los métodos de medición de la resistencia en serie de celdas solares.

L. Hernández y L. Rodríguez. Laboratorio de Investigaciones en Electrónica del Estado Sólido (LIEES) Facultad de Física, Universidad de La Habana

RESUMEN

Presentamos un estudio de los métodos de resistencia en serie a partir de las características volt-ampéricas en oscura e iluminados medidos experimentalmente.

ABSTRACT

We show review of solar cells series resistance bias experimental measurements of dark and illuminated current-voltage characteristics.

INTRODUCCIÓN

El valor de la resistencia en serie influye determinantemente en el máximo de potencia eléctrica que es posible obtener de una celda solar. Es por ello, que la resistencia en serie (R_s) es un parámetro de singular importancia para la caracterización de las celdas solares. Su valor indica la cualidad del dispositivo y puede ser utilizado para el control de la producción.

En la literatura aparecen más de una decena de trabajos publicados, donde se reportan diversos métodos para determinar R_s . En el presente artículo se realiza un análisis crítico de los diferentes métodos de medición, discutiéndose los resultados obtenidos.

En la mayoría de los casos, la característica volt-ampérica (I-V) de una celda solar iluminada puede ser descrita considerando una resistencia en serie concentrada (Fig. 1-a). Para una intensidad de la luz incidente sobre la celda la relación I-V viene dada por:

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_{sh} \cdot I}{R_{sh}} - I_s [\exp.\{\beta(V + IR_s)\} - 1] \quad (1)$$

donde,

I_{ph} es la fotocorriente; $\beta = \frac{q}{AKT}$; I_s es la corriente de saturación inversa del diodo y R_{sh} es la resistencia de shunt.

Los parámetros macroscópicos I_{ph} , I_s , A , R_{sh} y R_s están relacionados con las propiedades físicas de las celdas solares [1,2], siendo dependientes de la intensidad de la luz y de la temperatura. Estos parámetros son determinados de forma tal que reproducen a través de la ec.1 la característica I-V experimental (Fig. 1.6). Así, los métodos experimentales y teóricos para la determinación de R_s están basados en la relación explícita de I-V (ec.1).

MÉTODOS DE MEDICIÓN

En el presente trabajo se estudiaron 16 métodos de medición de R_s , de los cuales seis son en régimen de oscuridad, nueve en régimen de iluminación y uno que combina ambos regímenes.

Con estos métodos se midieron cuatro celdas solares, tres de silicio y una de AlGaAs/GaAs, cuyas características se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Celda	Área (cm ²)	Enrejillado	Construcción
Si ₁	5,36	peine	laboratorio
Si ₂	5,26	peine	laboratorio
Si ₃	20,47	radial	comercial
AlGaAs/GaAs	0,13	radial	laboratorio

En el caso de altas intensidades de luz incidente se tomaron las características I-V de las celdas de AlGaAs/GaAs de la literatura [3].

Los sistemas de medición utilizados, fueron los clásicos que se reportan. Para el caso de las mediciones bajo iluminación se tuvo en cuenta mantener la temperatura constante. Para ello, la celda se enfrió con agua y aire simultáneamente, a la vez que la celda se encontraba soldada a un soporte que disipaba rápidamente el calor. Las mediciones se realizaron a dos niveles de intensidad de corriente.

Los diferentes métodos estudiados para la evaluación de la resistencia en serie se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Método	Régimen	Referencia	Método	Régimen	Referencia
1	oscuridad	[4]	8	iluminada	[9]
2	oscuridad	[4]	9	iluminada	$R_s = \left[\frac{dI}{dv} \right]_{v=V_{oc}}^{-1}$
3	oscuridad	pendiente $R_s = \left[\frac{dI}{dv} \right]^{-1}$	10	iluminada	[10]
4	oscuridad	[5]	11	iluminada	[11]
5	oscuridad	[6]	12	iluminada	[12]
6	oscuridad	[7]	13	iluminada	[13]
7	oscuridad + iluminado	[8]	14	iluminada	[7]
			15	iluminada	[14]
			16	iluminada	[15]

Los métodos 10, 15 y 16 no se utilizaron para medir la R_s de las cuatro celdas. El método 10, utiliza la aproximación: $1 - \frac{I_{max}}{I_{cc}} \gg R_s/R_{sh}$

(donde I_{max} es la corriente al punto de potencia máxima e I_{cc} es la corriente de corto circuito), la cual solamente es válida a altas intensidades de luz, siendo sólo posible alcanzar en celdas de AlGaAs/GaAs.

En nuestras condiciones experimentales, estos altos valores de intensidad no fueron obtenidos de forma de satisfacer la aproximación en las celdas de Si.

El método 15 no representa variante nueva con relación a medir

$$R_s = \left[\frac{dI}{dv} \right]_{v=V_{oc}}^{-1}$$

El método 16 considera una resistencia distribuida, sin

embargo reporta un valor final de resistencia, que es el mismo si se emplea la ecuación [1]. Esto fue comprobado por nosotros para cada una de las muestras.

A las cuatro celdas solares, se les determinó, para dos niveles de iluminación, la resistencia en serie por los trece métodos de medición restantes. Los resultados aparecen en las figuras 2 - 5.

Para cada una de las celdas, a un nivel de iluminación y a un régimen dado, se determinó un valor medio de R_s y su desviación standard reportándose como ΔR_s .

Posteriormente, para cada método se determinó la desviación al valor medio de las cuatro celdas (ver ec-2) para los diferentes niveles de intensidad, cuyos resultados obtenidos se muestran en la fig. 6.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|R_{sj} - \bar{R}_{si}|}{R_{sj}} \quad (\text{ec - 2})$$

\bar{R}_{si} es el valor medio de R_s de la celda a una iluminación dada obtenida por los diferentes métodos.

R_{sj} es el valor de R_s obtenido por el método en cuestión para cada una de las celdas a los diferentes niveles de iluminación.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

De los resultados que se muestran en la figura 6 se observa que los métodos 1 y 7, en régimen de oscuridad, son los que presentan una mayor desviación de los valores medios.

En la aplicación del método 1, se comprobó que existe una gran dispersión en los valores obtenidos de R_s , para los diferentes valores de resistencia externa que se propone. A medida que aumenta la diferencia entre las resistencias externas aumentan los valores de R_s . La gran dispersión de los valores de R_s se debe a que fueron obtenidos a partir de un voltaje fijo, cuando se conoce que la resistencia en serie depende más fuertemente de la corriente que del voltaje. Por otra parte, el aumento de R_s con el ΔR_{ext} se debe a la deformación de la curva I-V, alejándose la zona de medición de la parte lineal, que es la más precisa.

El método 2 presenta buenos resultados, sin embargo, no es un método directo a partir de las características I-V, siendo necesario el uso de resistencias externas adicionales. La determinación de R_s , es de tipo gráfica, a partir de la intersección de dos rectas y requiere a través de un parámetro R' que depende fuertemente de donde se sitúe el origen de coordenadas.

El método 3 es el más utilizado por los experimentales, ya que es un método directo simple y como se muestra en la fig. 6, con buenos resultados. Sin embargo, debe tenerse cuidado en trabajar siempre en la zona lineal y a no muy bajas densidades de corriente.

El método 4, desarrollado por los autores de este trabajo, es el que presenta los mejores resultados. Sin embargo, hay que destacar que tampoco es un método directo ya que se utilizan resistencias externas, y sus valo-

res son determinantes en la medición de R_s . Por otra parte, la expresión final de R_s es dependiente del valor de A que es un parámetro de ajuste de las curvas I-V.

En general el método 5 se diferencia del Método de la pendiente, en que no desprecia ningún término de la ec. 1.

En el momento de la medición debe tenerse en cuenta que la diferencia entre los pares de valores de (I,V) no debe ser grande ya que provoca dispersión de R_s . Esto en la práctica conlleva al método de la pendiente. Observen que los resultados del método 3 y 5, son bastante cercanos.

El método 6 depende fuertemente de los valores de A e I_s , por lo cual lo hace poco práctico. Para nuestras celdas estos valores fueron tomados de la literatura [2, 16].

El método 7 asume que la geometría de los contactos es tal que la corriente que fluye en oscuridad es similar a la que circula bajo iluminación, estableciendo que la corriente en oscuridad $I=I_{cc}$ bajo iluminación. En general esta condición es bastante fuerte y sólo se aproxima si la distancia entre los contactos es el doble de la longitud de difusión. [17]

En la literatura los métodos más utilizados y desarrollados para la determinación de R_s bajo iluminación son los de Haudy y Wolf y como se observa de las figuras (2-6) son los métodos que presentan mejores resultados tanto a baja intensidad de luz como a alta.

El método 8 es el que presenta la mayor desviación. La dificultad principal de este método, es que la expresión para hallar R_s depende fuertemente del parámetro A , que como se ha expresado anteriormente es un parámetro de ajuste. Además el valor de R_s depende de la diferencia $I_{ph} - I_{max}$, y se acentúa más a bajas intensidades. Por otra parte, pequeños errores al determinar el punto de máxima potencia influyen fuertemente en el valor de R_s . Sin embargo, es importante señalar que se obtiene un valor de R_s para el punto de operación de la celda.

El método de la pendiente a bajas intensidades presenta buenos resultados, no así a las altas. Esto se debe a que cuando se trabaja a altas intensidades la parte lineal cercana al voltaje de circuito abierto se reduce. Como se conoce la R_s depende de la intensidad de la corriente y el valor de R_s obtenido en este método es precisamente en la región de más bajos valores de corriente.

El método 11 es interesante por ser poco sensible a variaciones no controladas de temperatura entre los diferentes puntos de la curva I-V y porque no requiere de ninguna hipótesis acerca del valor A . Es inadecuado para medir celdas de baja resistencia, a menos que la medición se realice a muy altos niveles de iluminación. Ello se debe a que, además de las hipótesis comunes a otros métodos (constancia del valor de la resistencia

en serie, aplicabilidad del principio de superación) se necesitan fuertes aproximaciones para llegar a la expresión de trabajo para calcular R_s . Por otra parte, también es muy sensible el error experimental cometido en la determinación del punto de máxima potencia.

El primer método reportado en literatura es de Wolf y Rauschenbach quien propuso la determinación de R_s a partir de las características I-V obtenidas a dos diferentes niveles de iluminación. La determinación de R_s a partir de la gráfica I-V se hace prefijando un valor arbitrario $\Delta I = I_{cci} - I_i$. Un aumento de ΔI conlleva un aumento del valor de R_s . De esta forma aparece una dispersión de valores en dependencia de los valores de ΔI escogido. Por otra parte el valor de R_s es un valor integrado de los diferentes niveles de iluminación utilizados. Como se ha expresado anteriormente, R_s depende del valor de la intensidad de corriente.

Los métodos de Wolf y Rauschenbach y el de Haudy son los de mayor justificación teórica. Este último presenta la dificultad de asegurar que la temperatura en una curva y la otra sea la misma. Además, la R_s medida a partir de tres niveles de iluminación es un promedio e independiente de la corriente.

El método 14 es una variante muy cercana al método 12. A las deficiencias antes señaladas hay que añadir que los valores de ΔV medidos son más imprecisos ya que se realizan en la región de curvatura de la característica I-V.

De las mediciones realizadas en régimen de oscuridad se observa que los valores de R_s disminuyen al aumentar la intensidad de la corriente. En general, los métodos en oscura presentan errores mayores a bajas intensidades de corriente debido fundamentalmente a las corrientes de difusión y recombinación.

Por otra parte, los valores de R_s obtenidos en oscura difieren de los obtenidos bajo iluminación. Tal resultado podría interpretarse, como que las mediciones en oscura pierden su significado debido a que las celdas trabajan bajo iluminación. Sin embargo, el resultado de R_s obtenido en los métodos de iluminación se reporta como independiente de la corriente que circula por la celda y entonces R_s no es más que un parámetro asociado a la resistencia de la celda y sirve como parámetro de ajuste al igual que $A e I_g$.

En el caso de pequeñas áreas o densidades bajas de corriente es posible utilizar la aproximación de resistencia concentrada; pero en los casos en que esto no se cumpla el valor que se obtiene de R_s es también un parámetro de ajuste.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor C.Dr. Osvaldo Vigil por las sugerencias críticas al trabajo.

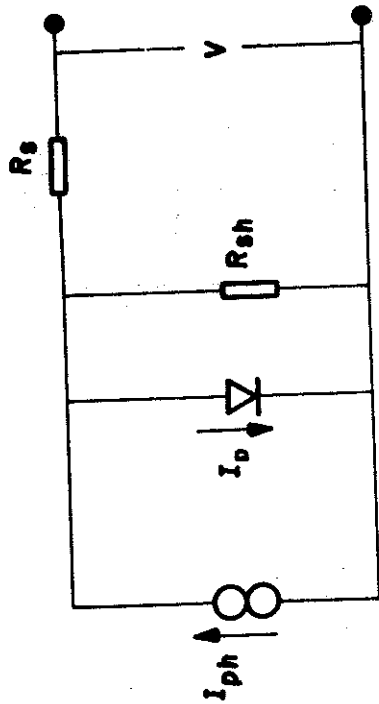


FIG. 1a.- CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR ILUMINADA.

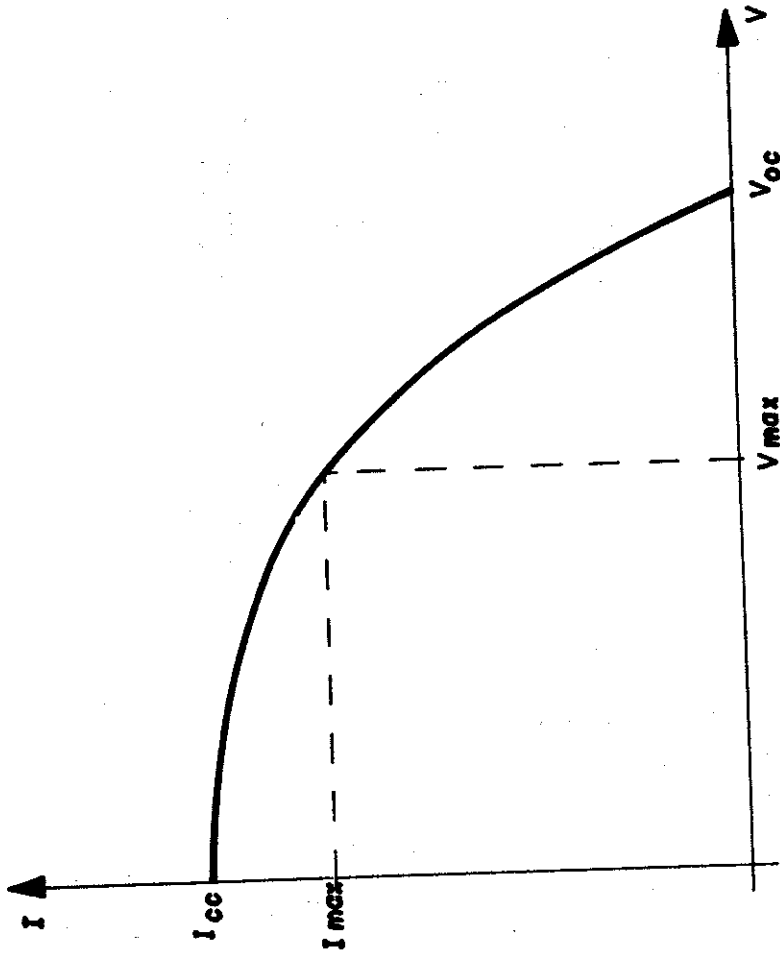


FIG. 1b.- CARACTERÍSTICA I-V, DE UNA CELDA SOLAR EN EL CUARTO CUADRANTE I_{max} Y V_{max} ES LA CORRIENTE Y EL VOLTAJE AL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA.

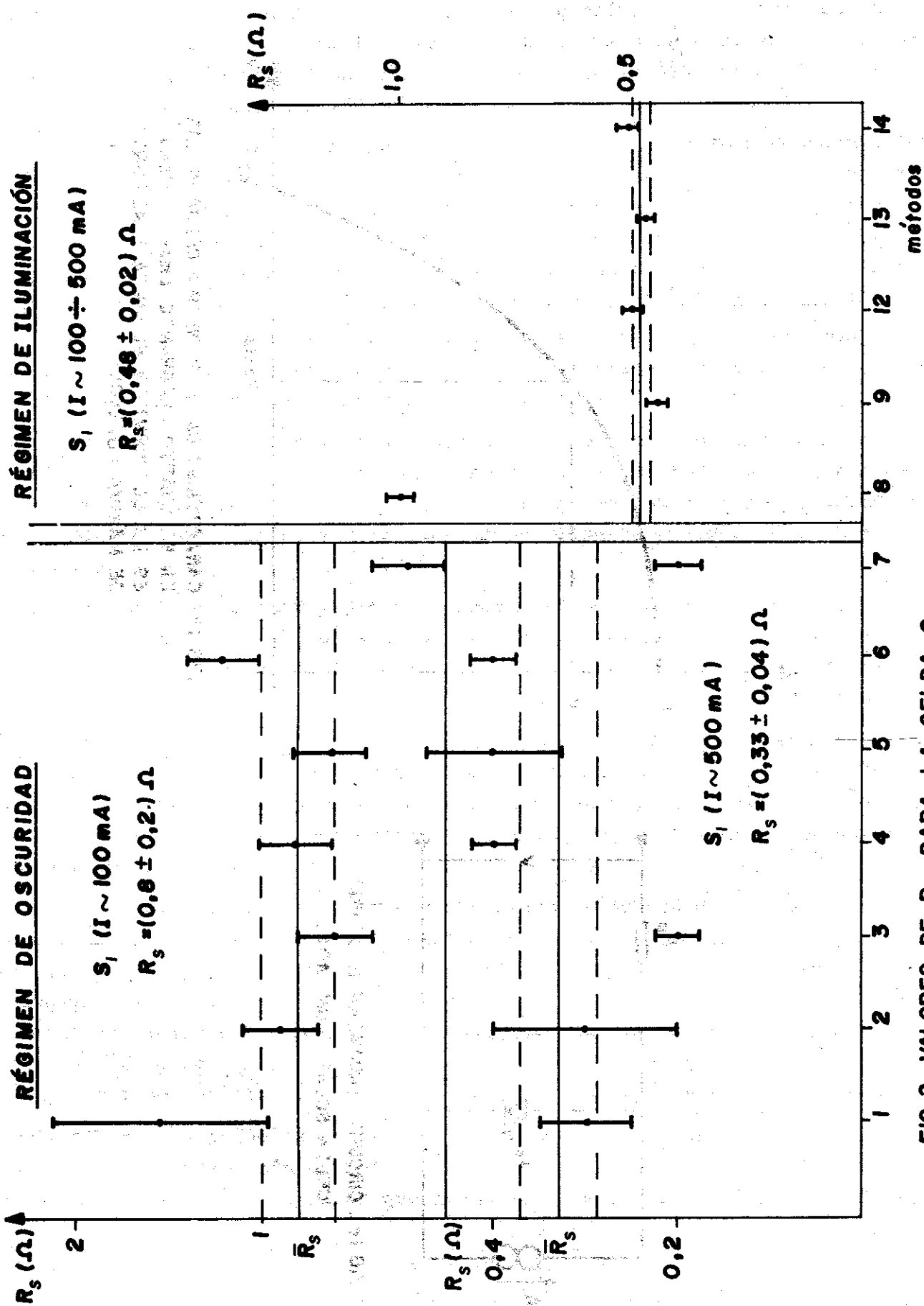


FIG. 2 - VALORES DE R_s PARA LA CELDA S_1

RÉGIMEN DE ILUMINACIÓN

$S_2 (I \sim 100 \div 500 \text{ mA})$
 $R_s = (0,57 \pm 0,02) \Omega$

RÉGIMEN DE OSCURIDAD

$S_2 (I \sim 100 \text{ mA})$
 $R_s = (0,6 \pm 0,2) \Omega$

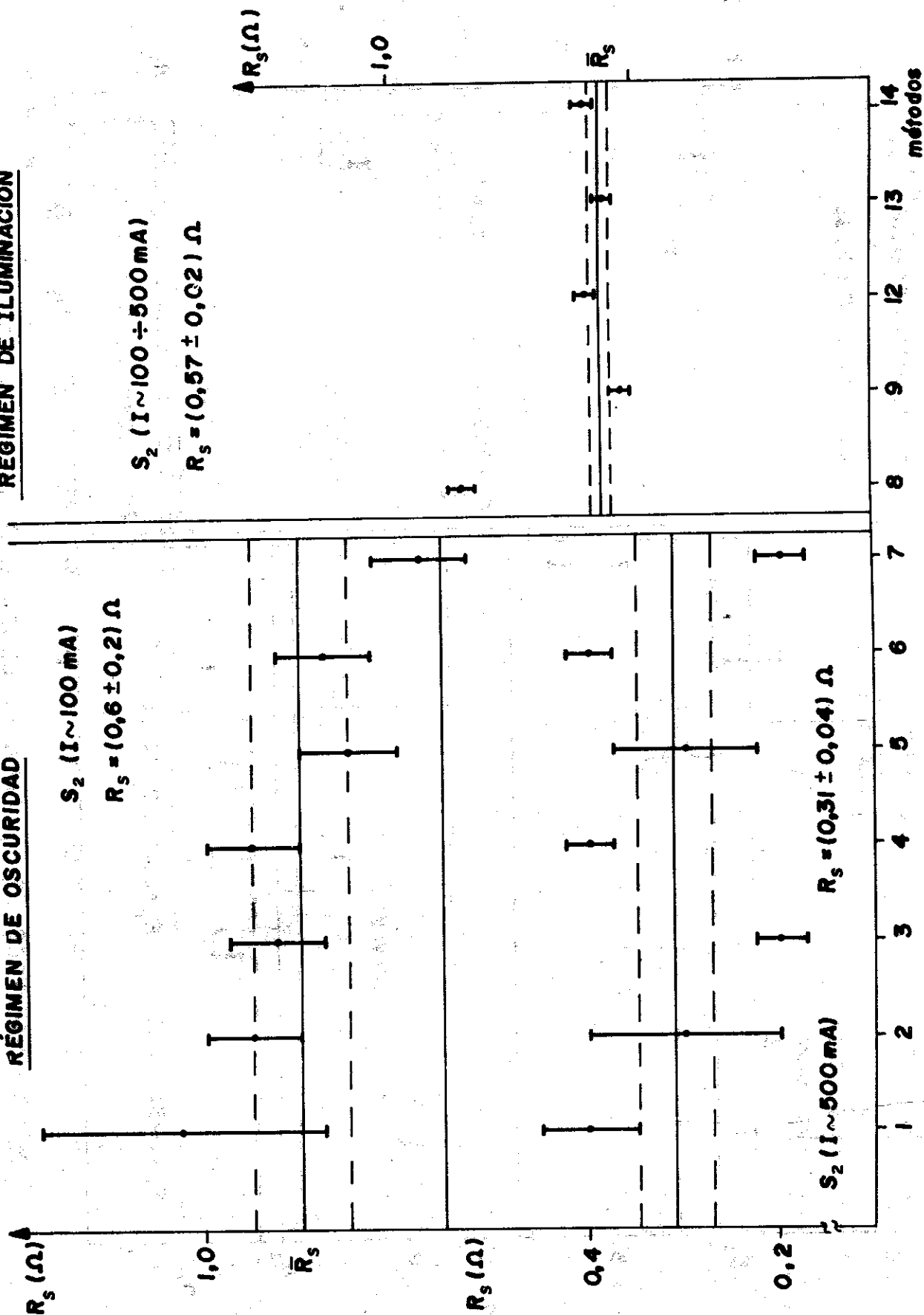


FIG. 3 - VALORES DE R_s PARA LA CELDA S_2

RÉGIMEN DE OSCURIDAD

RÉGIMEN DE ILUMINACIÓN

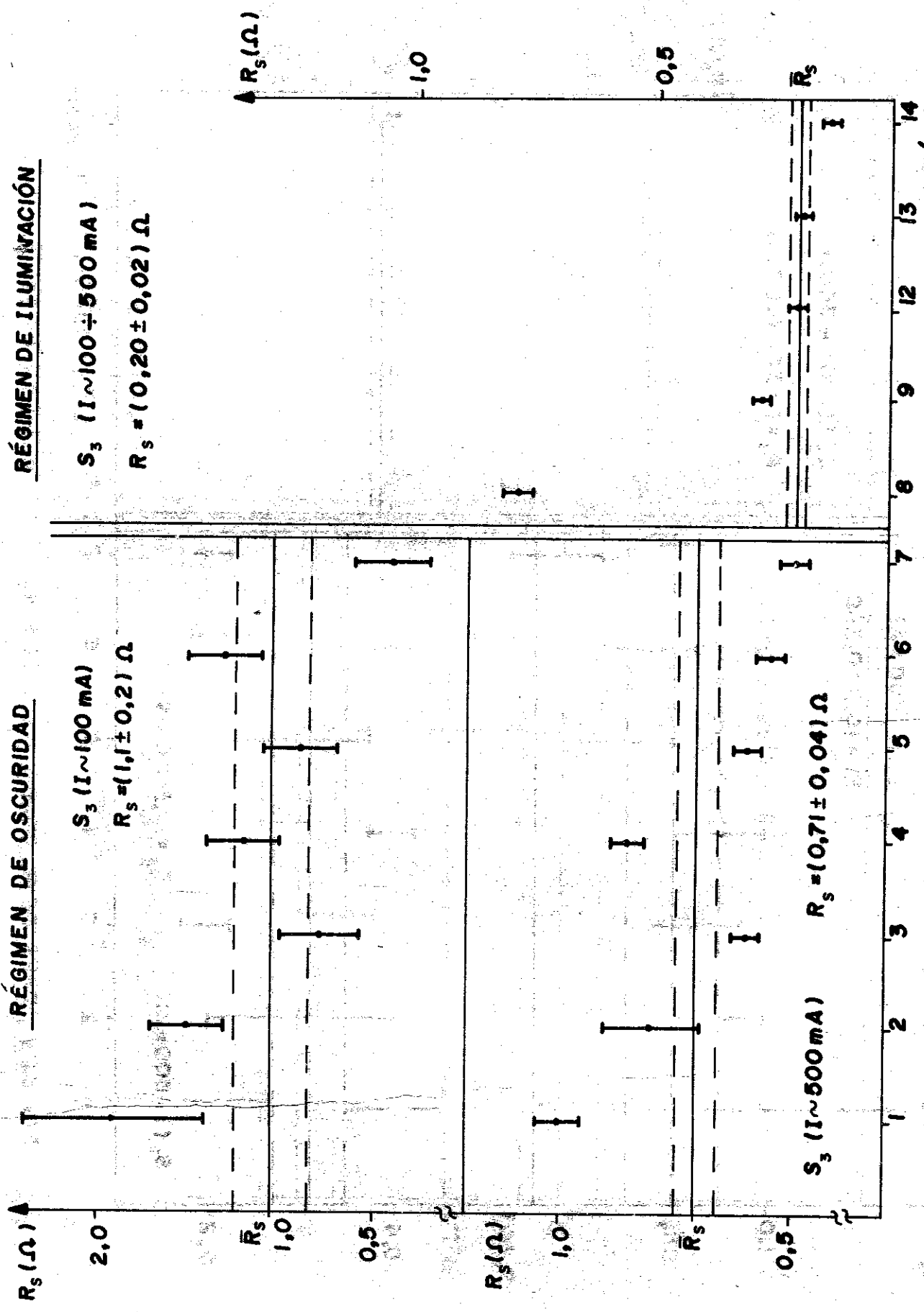


FIG. 4.- VALORES DE R_s PARA LA CELDA S_3

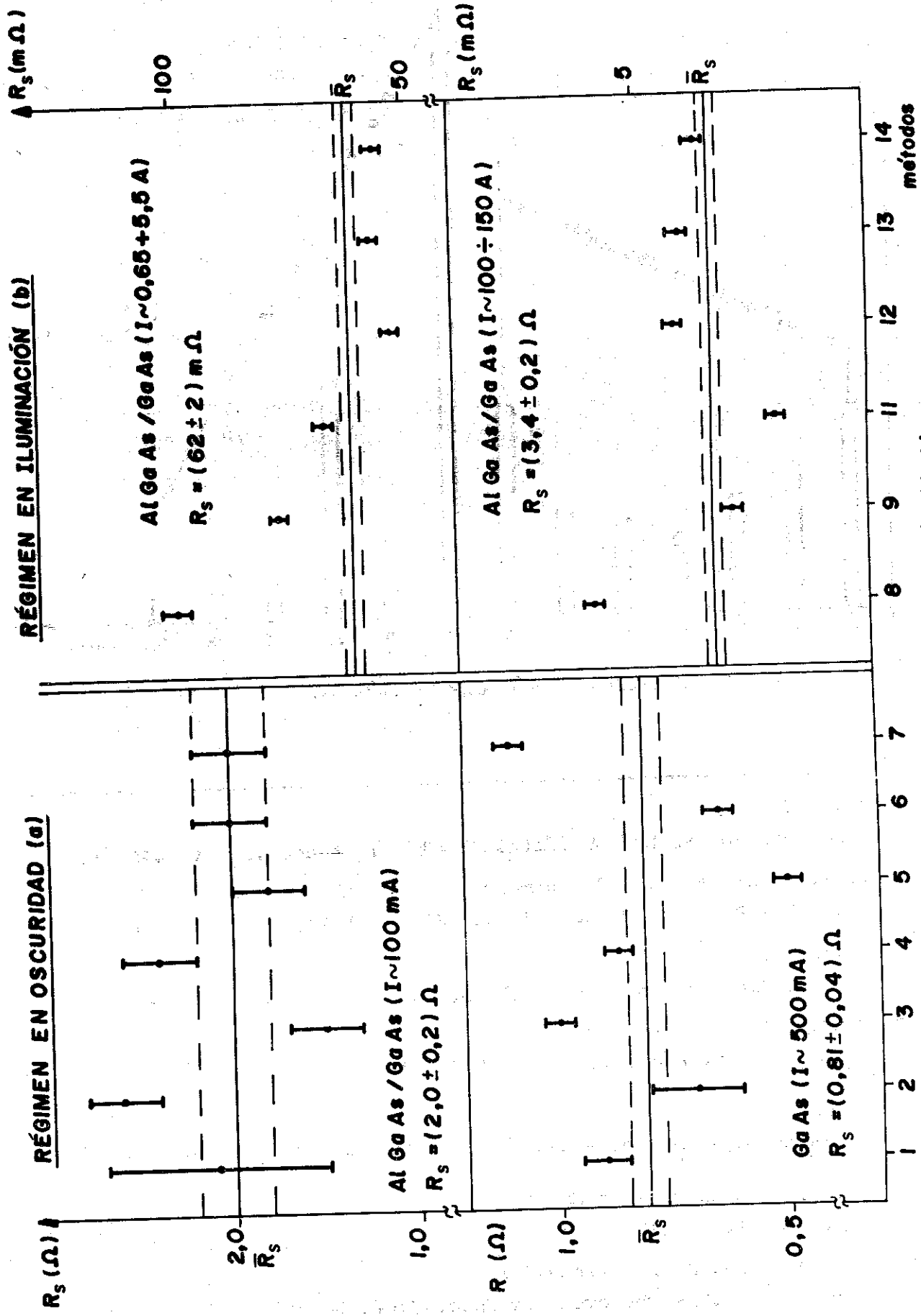


FIG.5- (a) VALORES DE R_s PARA LA CELDA ALGaAs (tabla 1)
 (b) VALORES DE R_s PARA LA CELDA ALGaAs [3]

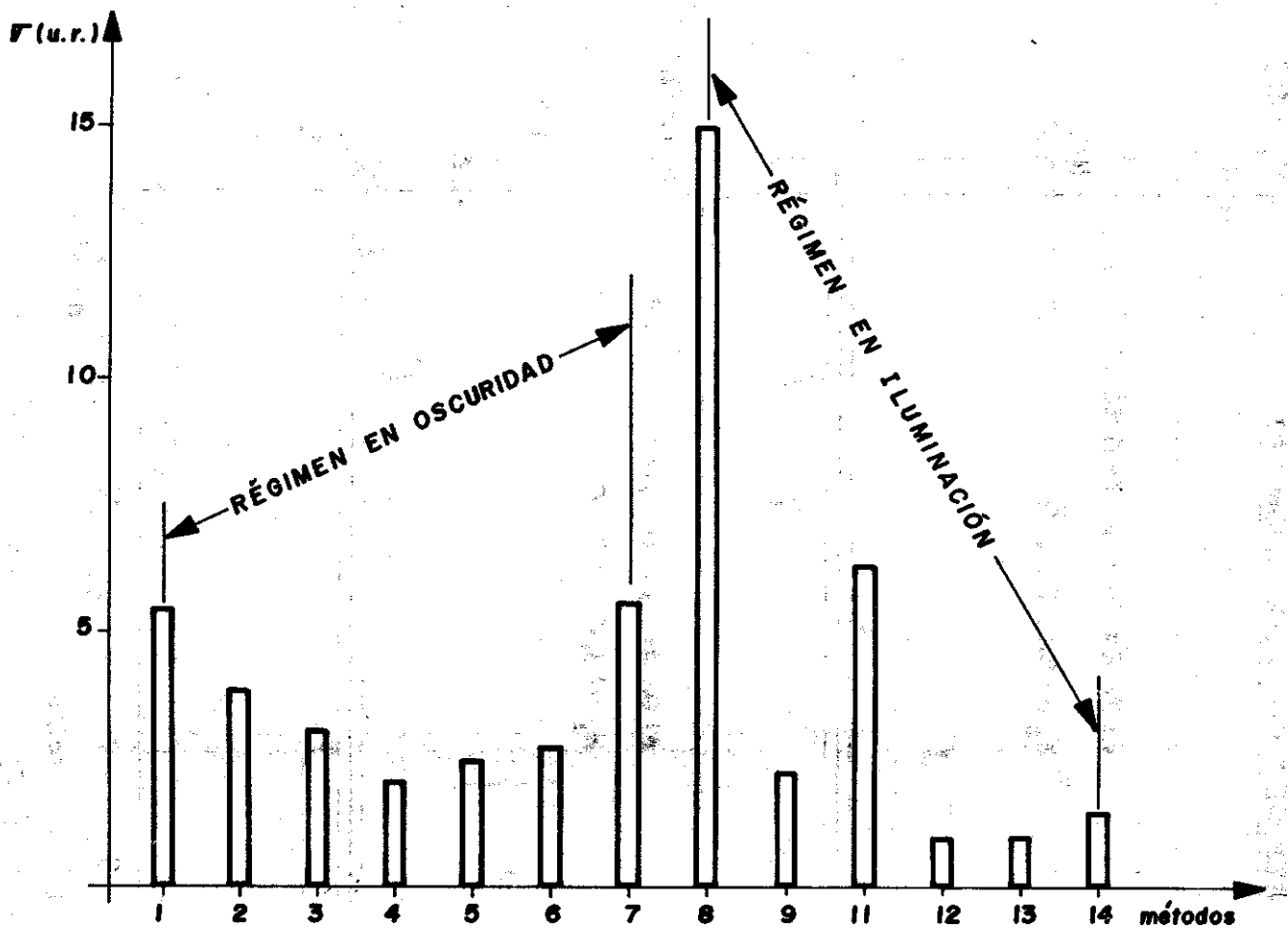


FIG. 6. DESVIACIÓN SEGÚN ec.2.VS métodos.

REFERENCIAS

- [1] Hovel, H.J.
Semiconductors and Semimetals. vol. 11. Academic N.Y. (1975).
- [2] Díaz, P.; L.Hernández and R.Romero
Crystal Res. and Technol. 17 (1) 67-72, 1972.
- [3] Hernández, L.
Tesis Candidato a Doctor, Universidad de La Habana, mayo 1984.
- [4] Calestany, J. y L.Castañer
Revue. Phys. Appl. 18 (1983) 565-567.
- [5] Rodríguez, L.
Tesis de Diploma, Universidad de La Habana. Julio 1986.
- [6] Araujo, G.L.; E.Sánchez, M.Martí
Solar Cells, 5 (1982) 199-200.
- [7] Inamura, M.S. and J.I.Portscheller.
Proc. VIII IEEE Photovoltaic Spec. Conf. Seattle 1970 (p.102).

- [8] Rajkanan, K. and J. Shewcheyn.
Sol. Stat. Elect. Vol 22 pp 193 (1979).
- [9] Singh, V.N. and R.P. Singh
J. Phys. D. Appl. Phys. 16, 1829 (1983).
- [10] Cape, J.A. and S.W. Zehr
Proc. XXIV IEEE Photovoltaic Spec. Conf. San Diego 1980 (p. 449).
- [11] Mialhe, P. and J. Charette
Amer. J. Phys. 51, 68 (1983).
- [12] Wolf, M. and H. Rauschenbach.
Adv. Energy Conv. 3, 445 (1963).
- [13] Haudy, R.J.
Solid State Elect. 10, 675 (1967).
- [14] Chaffin, R.J. and G.C. Osborn
Appl. Phys. Letters 37, 637 (1980).
- [15] Smirnov, G.M. and J.E. Mahan
Solid State Elect. 23, 1055 (1980).
- [16] Martell, A.; S. Aguilera; N. Safronova and M. García
Cryst. Res. and Technol. 20, 1261 (1985).
- [17] Wysocki, J.J.
RCA. Rev. 22, 57 (1961)

Recibido: 31 de diciembre de 1986