

1. Classificação INPE-COM.4/RPE C.D.U.: 535.215		2. Período	4. Distribuição	
3. Palavras Chaves (seleccionadas pelo autor)  CÉLULA SOLAR EFEITO FOTOVOLTAICO			interna <input type="checkbox"/>	externa <input checked="" type="checkbox"/>
5. Relatório nº INPE-2141-RPE/363	6. Data Junho, 1981		7. Revisado por <i>AFS</i> Antonio F. da Silva	
8. Título e Sub-Título  CARACTERIZAÇÃO I - V DE CÉLULAS SOLARES			9. Autorizado por <i>Parada</i> Nelson de Jesus Parada Diretor	
10. Setor DTE	Código		11. Nº de cópias 11	
12. Autoria Nelson Veissid R. Parraud F.J. Fonseca			14. Nº de páginas 11	
13. Assinatura Responsável <i>Nelson Veissid</i>			15. Preço	
16. Sumário/Notas  <i>Analisando-se alguns circuitos equivalentes simples e comparando-se as características I x V obtidas, com esses circuitos, com aquelas mostrados por diferentes células solares, apresentam-se algumas conclusões de interesse para a caracterização das células. As medidas foram feitas em condições naturais (perto de AM1) e artificiais (simuladores solares construídos com fontes de luz de fácil acesso e com vários filtros). A identificação dos componentes do circuito equivalente, com mecanismos envolvidos na conversação fotovoltaica, é de primordial importância na otimização do desenho da célula. Discute-se a obtenção de valores precisos destes parâmetros a partir das características I-V da célula, e propõe-se um método numérico para a obtenção da resistência em série.</i>				
17. Observações  <i>Trabalho submetido para apresentação na 33a. Reunião Anual da SBPC, 8 a 15 de julho de 1981, Salvador, Bahia e submetido para publicação da Revista Brasileira de Física.</i>				

## Caracterização I-V de Células Solares

NELSON VEISSID, R. RANVAUD E F.J. FONSECA

Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq - 12200 S.J. dos Campos, SP.

In this work some simple equivalent circuits are analysed and then IxV characteristics obtained from different solar cells are compared with those from the circuits. Some interesting conclusions about the solar cell characterization are also shown. The measures were obtained under natural conditions (next to AM1) and under artificial conditions (solar simulator made of easily obtained light sources and several filters). The identification of components in the equivalent circuit, together with the theory of photovoltaic conversion, is very important in the optimization of the cell drawing. A numeric method for determination of the series resistance then is finally proposed.

Analisando-se alguns circuitos equivalentes simples e comparando-se as características I x V obtidas, com esses circuitos, com aquelas mostrados por diferentes células solares, apresentam-se algumas conclusões de interesse para a caracterização das células. As medidas foram feitas em condições naturais (perto de AM1) e artificiais (simuladores solares construídos com fontes de luz de fácil acesso e com vários filtros). A identificação dos componentes do circuito equivalente, com mecanismos envolvidos na conversão fotovoltaica, é de primordial importância na otimização do desenho da célula. Discute-se a obtenção de valores precisos destes parâmetros a partir das características I-V da célula, e propõe-se um método numérico para a obtenção da resistência em série.

Prince (1955) publicou uma teoria geral, na qual sugere que uma célula solar pode ser estudada, considerando-a como se fosse uma fonte de corrente em paralelo com a junção p-n. Desde então, vários artigos foram publicados a respeito de circuitos equivalentes de células solares, e também desenvolveu-se muitos métodos numéricos para a determinação dos parâmetros envolvidos nos circuitos equivalentes simples (Wolf and Rauschenbach, 1963).

O circuito equivalente, mais comumente adotado e aqui considerado, é a associação de um gerador de corrente com um diodo e uma resistência, ligados em paralelo, e com uma segunda resistência ligada em série, conforme a Figura 1.

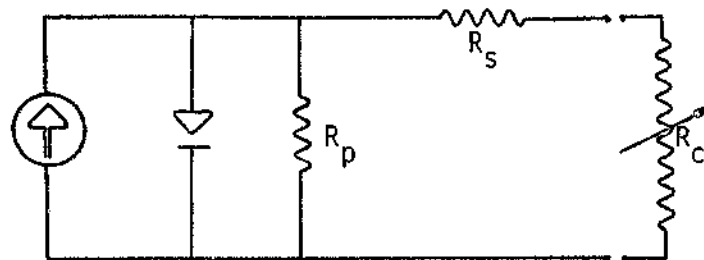


Fig. 1 - Circuito equivalente de uma célula solar.

O interesse do estudo de um circuito equivalente reside no fato de que, através do ajuste de uma característica  $I \times V$  da célula, determinam-se as origens de desvios entre uma situação ideal e o caso real. O gerador de corrente simula a corrente de portadores minoritários foto gerados, que atravessam a região de depleção, impulsionados pelo potencial elétrico existente no interior da junção p-n. O diodo simula o comportamento característico da corrente reversa e direta na junção. A resistência em série aparece devido à resistividade do semicon

dutores não ser nula, assim como a resistividade própria dos contatos metálicos (dependendo também do desenho da grade coletora). A resistência em paralelo é consequência da fuga de corrente através da junção pela borda da célula solar, conforme a Figura 2.

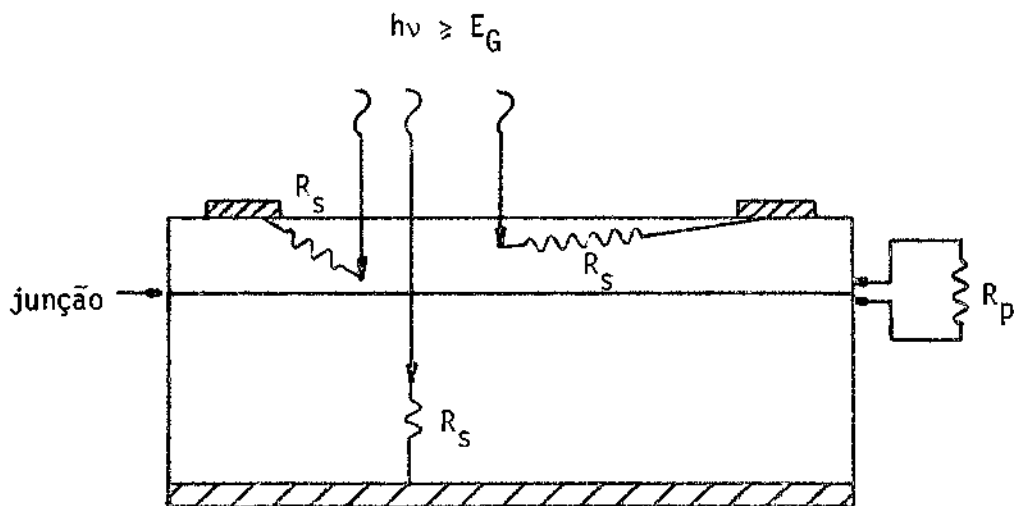


Fig. 2 - Diagrama de resistências numa célula solar.

Pelo circuito equivalente da Figura 1, tem-se a seguinte equação aproximada para a curva  $I \times V$  da célula solar:

$$I = I_0 \left\{ \exp \frac{e(V - IR_s)}{AKT} - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_L \quad (1)$$

onde:  $I_0$  - corrente de saturação.

$I_L$  - corrente fotogerada.

$A$  - fator de diodo.

Tomando-se a curva  $I \times V$  no terceiro quadrante, tem-se que:

$$\exp \frac{e(V - IR_s)}{AKT} \ll 1,$$

Sendo que normalmente  $I_0 \ll I_L$  e  $V \gg IR_S$ , determina-se  $R_p$  pela seguinte expressão:

$$R_p = \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2)$$

Considerando-se que no terceiro quadrante, a seguinte aproximação é válida,

$$I = \frac{V - IR_S}{R_p} - I_L,$$

conclui-se que o efeito de  $R_p$  será modificar a inclinação da curva  $I \times V$  no 3º quadrante.

Usando-se valores característicos para uma célula solar de silício, tais como:  $I_L = 100$  mA (referente a uma área de  $4 \text{ cm}^2$  com iluminação AM1),  $V = 0,5V$  e  $R_S = 1\Omega$ , determina-se primeiramente o valor mínimo de  $R_p$  necessário para que a curva se desloque verticalmente 0,1%, isto é, que

$$I(V = -0,5V) \leq -1,001 I_L$$

Desta maneira, tem-se que:

$$R_p \geq 400 \Omega$$

Conclui-se que se  $R_p \geq 400 \Omega$ , o efeito não será observável na característica  $I \times V$  aqui considerada. Faz-se a medida de  $R_p$  observan

do-se a inclinação da curva  $I \times V$  no 3º quadrante, conforme a Equação 2.

Caso essa inclinação seja nula, a resistência em paralelo pode ser eliminada do circuito equivalente e a Expressão 1 reduz-se simplesmente à seguinte fórmula:

$$I = I_0 \left\{ \exp \frac{e(V - IR_s)}{AkT} - 1 \right\} - I_L, \quad (3)$$

onde  $R_s$  pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_s = \frac{1}{I} \left\{ V - \frac{AkT}{e} \ln \left( \frac{I + I_L + I_0}{I_0} \right) \right\} \quad (4)$$

Precisa-se obter, agora, os valores da voltagem de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e da corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), em diferentes intensidades de luz, para a determinação dos parâmetros  $I_0$  e  $A$  da Equação 3. Usando-se a expressão:

$$V_{oc} = \frac{AkT}{e} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (5)$$

e fazendo-se um ajuste da reta,  $V_{oc} \times \ln I_{sc}$ , pelo método dos mínimos quadrados, determina-se  $I_0$  e  $A$ .

Para testar a validade da análise acima, montou-se, com uma célula solar "Solarex" de 2 cm x 2 cm de uso espacial, um dispositivo que permite variar a inclinação da célula em relação à direção dos raios solares.

Tem-se na Figura 3 o diagrama do equipamento de medida da curva  $I \times V$

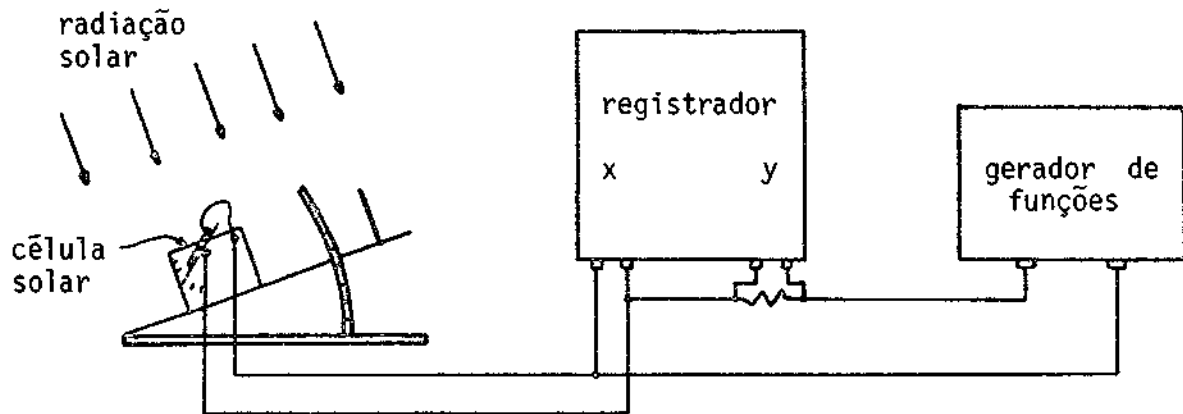


Fig. 3 - Equipamento de medida da curva  $I \times V$ .

Na Figura 4 tem-se uma série de curvas de corrente por voltagem, para diferentes inclinações em relação à radiação solar. Com um sistema de fluxo de ar forçado, mantêm-se a temperatura da célula em  $37^{\circ}\text{C}$ .

Para a série de curvas da Figura 4, os valores obtidos foram:

$$I_0 = 3,12 \times 10^{-10} \text{ A}$$

$$A = 1,052$$

Determina-se a resistência em série ( $R_s$ ) pela Expressão 4. Na Figura 5, tem-se os valores de  $R_s$  em função da corrente, para a série de curvas da Figura 4.

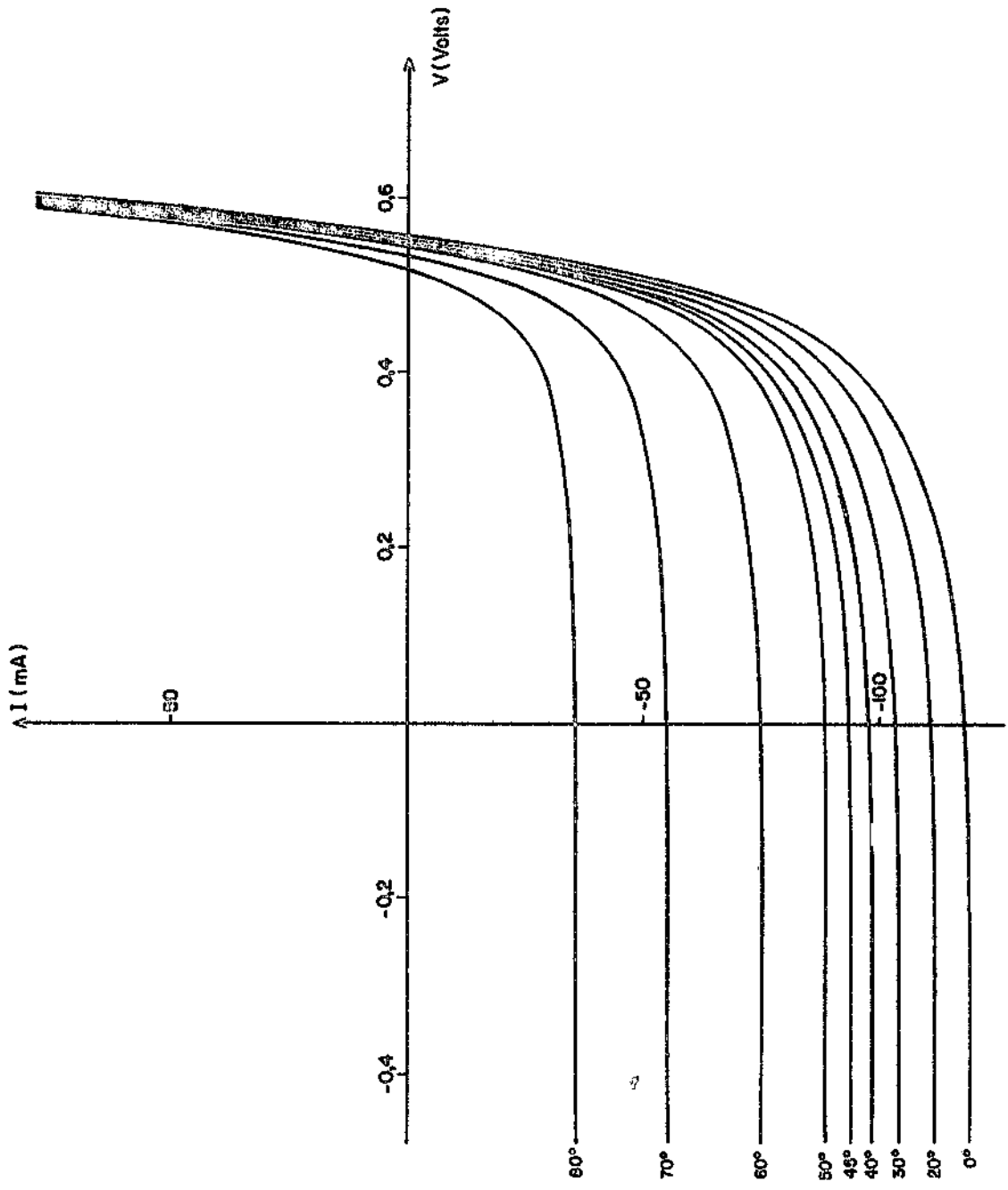


Fig. 4 - Curvas características de uma célula solar, em diferentes inclinações.



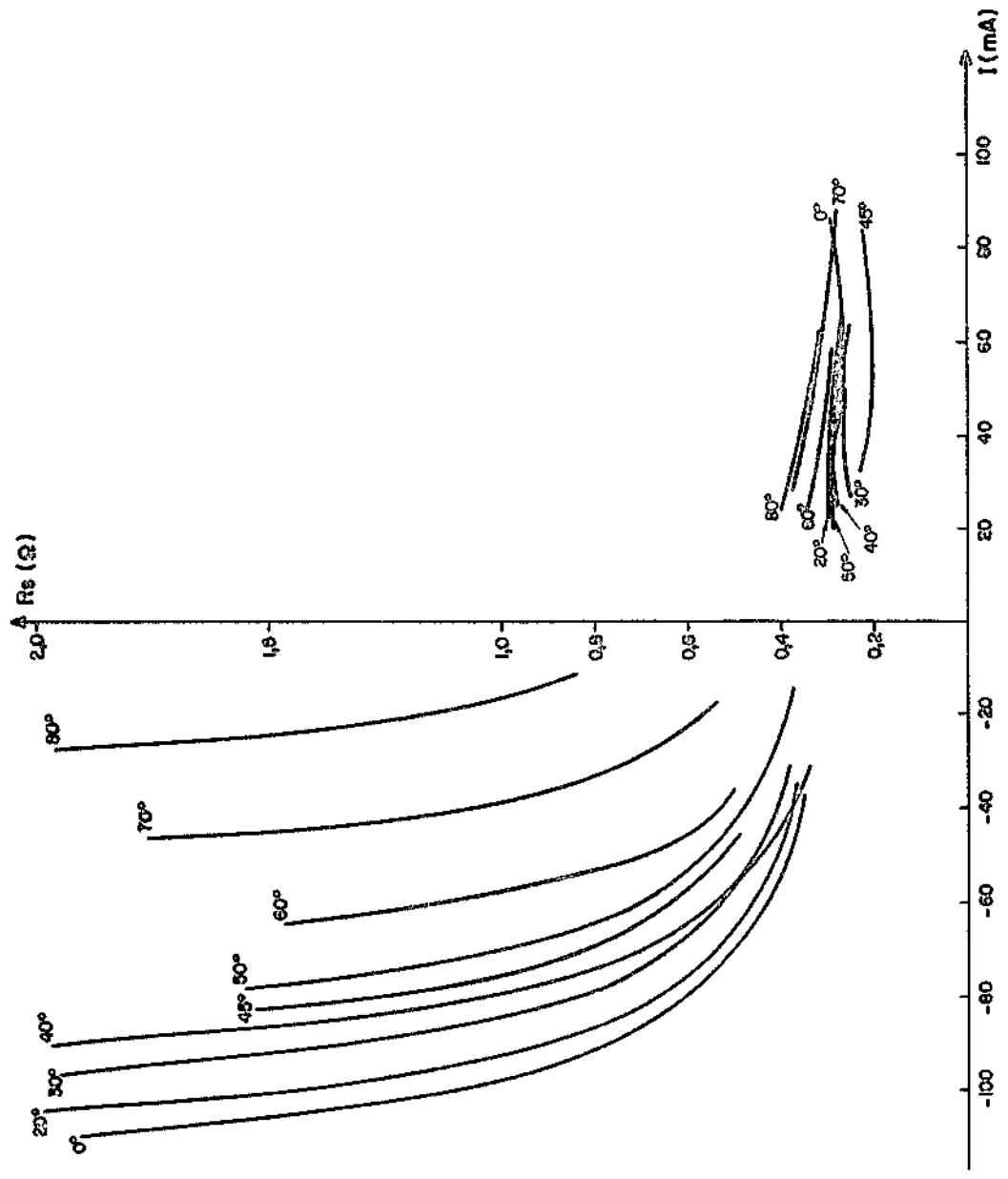


Fig. 5 - Curvas da resistência em série, para diferentes inclinações.

Convém salientar que o método de calcular  $R_s$ , proposto neste trabalho, não fornece informações relativas às propriedades físicas fundamentais da célula solar, como comprimento de difusão ou tempos de recombinação, mas é um excelente método para a determinação de parâmetros globais da célula, o qual é de primordial interesse tecnológico. O comportamento de  $R_s$  em função da corrente, visto na Figura 5, não significa que ela varia realmente dessa forma em relação à corrente. Este comportamento pode ter origem na ausência de outros possíveis termos na Equação 3. Por exemplo, uma segunda exponencial, com fator de qualidade igual a 2, que corresponderia aos efeitos de geração e recombinação de pares através de um nível "trapping" dentro da região de depleção, poderia modificar consideravelmente o comportamento de  $R_s(I)$ . Um tratamento mais completo da característica  $I \times V$ , envolveria a introdução de ulteriores exponenciais com fatores de qualidade maior que 2, relativos a vários fenômenos, tais como tunelamento, "breakdown" microplasma, "surface leakage", precipitados metálicos e "surface channeling" (Wolf, Stirn and Noel, 1977). Estudos nesse sentido estão sendo desenvolvidos em continuação ao presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. Prince, M.B. Silicon solar energy converters. *Journal of Applied Physics*, 26(5):534-540, May 1955.
2. Wolf, M.; Rauschenbach, H. Series resistance effects on solar cell measurements. *Advanced Energy Conversion*, 3(2):455-479, Apr. - June 1963.

3. Wolf, M.; Noel, G.T.; Stirn, R.J. Investigation of the double exponential in the current-voltage characteristics of silicon solar cells. IEEE Transaction on Electron Devices, 24(4):419-428, Apr., 1977.