

## CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE FOTOGERADA POR UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA MULTIJUNÇÃO ATRAVÉS DE MEDIDAS DE RADIAÇÃO ESPECTRAL

H. Muniz<sup>1,2</sup>, O. C. Vilela<sup>1</sup>, N. Fraindenraich<sup>1</sup>

Universidade Federal de Pernambuco, Grupo de Fontes Alternativas de Energia  
Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP/O.S. Recife, Brasil  
Tel. 05581-3183-4255 email: helmut@itep.br

*Recibido: 10/08/12; Aceptado: 03/10/12*

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo comparar o comportamento da corrente fotogerada por uma célula fotovoltaica de multijunção (MJ), determinado a partir de medidas de irradiância espectral e da resposta espectral fornecida pelo fabricante, com medidas experimentais de sua corrente de curto circuito para validar a equivalência entre esses parâmetros, bem como definir a junção responsável pela limitação da corrente elétrica estabelecida na célula a partir da avaliação da razão entre as correntes geradas ( $r_c$ ) pelas junções do topo e intermediária. Para tanto, medidas espectrais foram realizadas através da utilização de um espectroradiômetro cuja faixa espectral de leitura está entre 200 nm e 1100 nm. A célula MJ empregada durante os experimentos possui três junções constituídas de fosfeto de gálio índio (InGaP) na camada do topo, arseneto de gálio índio (InGaAs) na camada intermediária e germânio (Ge) na base.

**Palavras-chave:** Célula Multijunção, Corrente Fotogerada, Irradiância Espectral

### INTRODUÇÃO

Células solares de multijunção (MJ), formadas pela sobreposição de materiais distintos, têm sido capazes de melhorar consideravelmente a eficiência dos dispositivos fotovoltaicos. Atualmente, a eficiência máxima de conversão está estabelecida em 43,5% para uma célula com 0,3124 cm<sup>2</sup>, com um espectro AM1,5D sob 418 sóis a 25 °C (Green, 2011). Isso se dá pelo fato de cada camada da célula interagir com diferentes trechos do espectro eletromagnético da radiação solar em uma faixa específica de comprimento de onda (Yamaguchi et al, 2006). A constatação de que elevados valores de eficiência são tangíveis na prática, têm incentivado a pesquisa sobre o desempenho desses dispositivos. Os ensaios de desempenho, em geral, são realizados em laboratórios equipados com fontes artificiais de radiação e condições controladas de temperatura de forma a garantir a repetitividade dos resultados. Contudo, ensaios sob condições naturais de irradiância e temperatura fornecem informações relevantes para a determinação do comportamento real da célula (Tanabe, 2009).

O conhecimento dos parâmetros característicos das células MJ permite prever seu desempenho sob condições operacionais distintas de irradiância e de temperatura. Diversos trabalhos apresentam o comportamento das células MJ com concentração sob condições controladas (King, R.R. et al., 2005; Nishioka K. et al., 2006; King, R.R. et al., 2007; Guter, W. et al., 2009). Como as células e os módulos fotovoltaicos são seletivos em relação ao comprimento de onda da radiação sobre eles incidente, o tipo de material empregado em cada junção define sua interação com o espectro da radiação solar. As variações do espectro ao longo do dia, devido às diferentes massas de ar atravessadas pelos raios solares imprimem a necessidade de realização de medidas do espectro da irradiância solar para a caracterização desses dispositivos.

A curva característica de uma célula solar é determinada por diferentes parâmetros, entre eles: corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima e fator de forma. Em uma aproximação bastante usual, quando a tensão entre os terminais da célula aproxima-se de zero (curto), o valor estabelecido para a corrente elétrica é assumido como sendo equivalente à própria corrente fotogerada (Green, 1982). Dominguez et al. (2010), propuseram uma metodologia experimental para a caracterização de células FV de multijunção que permite prever a curva característica da célula para diferentes condições de irradiância, temperatura e espectro solar. O procedimento proposto evita a utilização de um espectroradiômetro nos ensaios, entretanto, exige a utilização de células de referência de cada material que compõe a multijunção. Na caracterização das células uma fonte artificial de radiação é utilizada (flash). Informações importantes sobre o funcionamento de uma célula de MJ com ensaios realizados em condições reais de operação foram obtidas por Muniz et al, (2011). Os parâmetros característicos para uma célula operando em diferentes níveis de concentração da radiação solar foram extraídos dos dados experimentais utilizando o modelo de um diodo. Esse tipo de caracterização considera as três junções como um bloco único, sem analisar o comportamento individual de cada subcélula.

O procedimento utilizado para a análise das junções através das medidas espectrais permite obter características de geração de cada subcélula sem a necessidade de contar com as mesmas construídas individualmente. O valor da corrente da célula como um todo é obtido diretamente pelas medidas realizadas, observando-se a limitação imposta pela junção que gera a menor corrente (células em série). Ainda, a junção responsável pela definição da corrente da célula é identificada. Dessa forma, para obter a corrente fotogerada de uma célula MJ e definir a junção determinante da corrente da célula como um todo, medidas de irradiância espectral sob diferentes condições atmosféricas foram realizadas utilizando-se um espectroradiômetro. Considerando-se a resposta espectral da célula fornecida pelo fabricante, calculou-se a corrente fotogerada por cada uma de suas junções. A corrente de curto da célula, medida simultaneamente com o espectro foi

comparada com a corrente fotografada. O comportamento interno da célula foi analisado através de parâmetros característicos de cada subcélula.

## MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA ESPECTRAL

Tanto a quantidade quanto a qualidade da irradiância solar afetam diretamente a produção de energia dos dispositivos fotovoltaicos. Tal qualidade é definida pela distribuição espectral da radiação solar disponível e sua variação pode ser facilmente exemplificada pela mudança de cor apresentada pela abóbada celeste durante um dia claro. Ou seja, a mudança de coloração do céu entre vermelha, azul e vermelha entre o início e o fim do dia ocorre em função da composição da atmosfera e da massa de ar atravessada pela luz. Essa mudança é avaliada em termos geométricos pela massa de ar (AM), cuja definição é feita pela secante do ângulo formado entre as direções do Sol e do zênite sobre determinado ponto da superfície ou da atmosfera, ou seja, o ângulo zenital. Como exemplo de diferentes espectros da radiação solar, a Figura 1 apresenta três distribuições: AM0, AM1,5G e AM1,5D, cujas nomenclaturas correspondem, respectivamente, aos comportamentos da irradiância incidente sobre a atmosfera e das irradiâncias global e direta sobre a superfície terrestre.

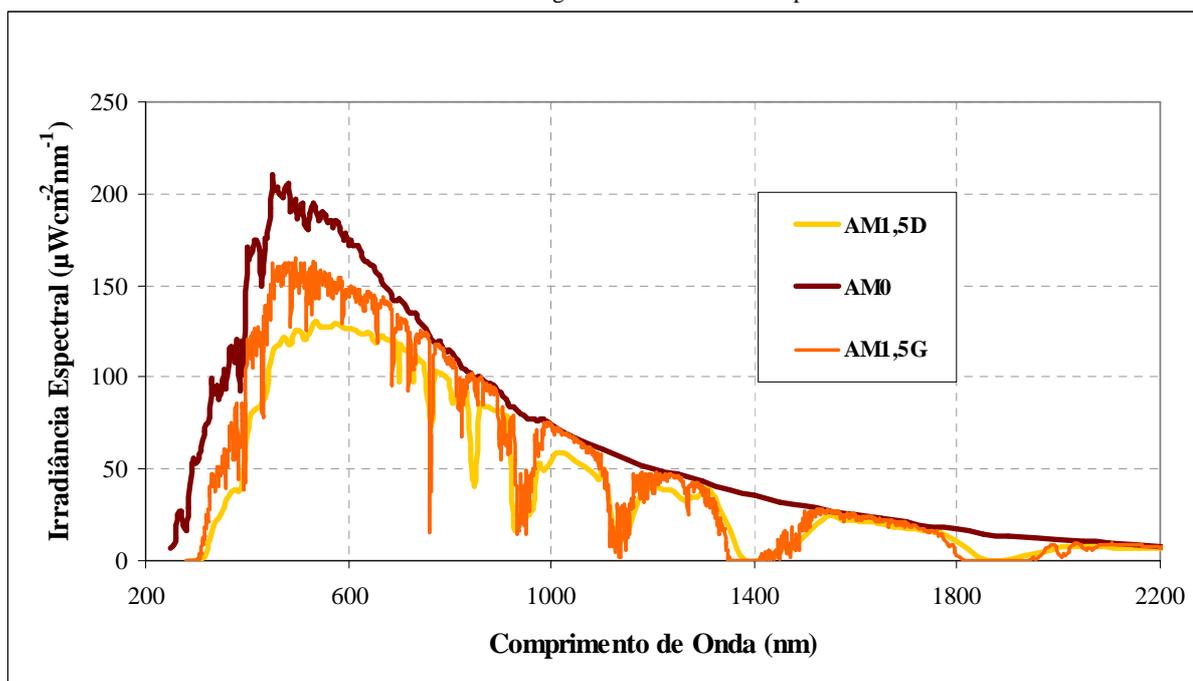


Figura 1: Distribuições espectrais AM0, AM1,5D e AM1,5G (Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>).

Além do ângulo zenital, a inclinação e o posicionamento do plano sobre o qual incide a irradiância com a superfície horizontal, a turbidez da atmosfera, a temperatura, a pressão e umidade ambiente, bem como o albedo são os fatores que caracterizam a distribuição espectral (Krawczynski et al, 2010). As maiores variações da radiação espectral com a massa de ar encontram-se entre 300 nm e 600 nm e são decorrentes do espalhamento sofrido pela radiação solar ser maior em comprimentos de onda menores. Na região do infravermelho predomina o fenômeno de absorção da radiação que ocorre em comprimentos de onda específicos, causando a perda efetiva de energia da radiação para as partículas em suspensão e o surgimento das chamadas janelas atmosféricas (Duffie, 1991).

Por isso, para avaliar a capacidade de geração de corrente pela célula MJ através de medidas de irradiância espectral, empregou-se um espectroradiômetro, modelo HR4000CG-UV-NIR, cuja faixa de leitura está entre 200 nm e 1100 nm para realizar a aquisição das medidas espectrais. Um difusor com 3,90 mm de diâmetro acoplado na entrada da fibra óptica foi usado para ampliar a abertura angular de incidência da radiação. Devido às oscilações das medidas nas extremidades da resposta do equipamento, a alta resolução (aproximadamente 0,25 nm) só ocorre entre 300 e 800 nm, porém as medidas foram feitas até 1050 nm. A Figura 2 apresenta um conjunto de medidas espectrais para valores de irradiância absoluta contidos no intervalo de 133  $\text{W/m}^2$  a 1033  $\text{W/m}^2$ .

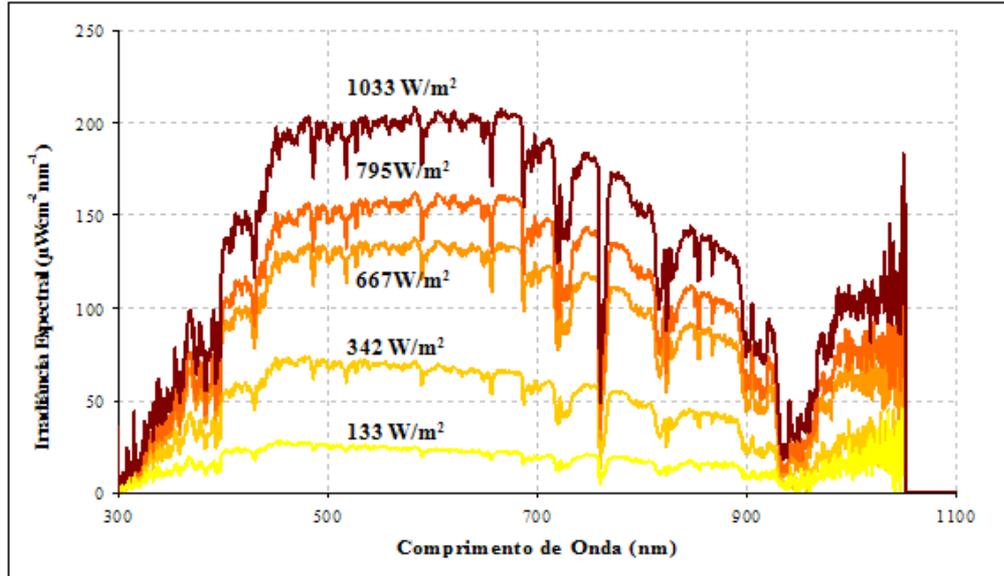


Figura 2: Medidas de irradiância espectral efetuadas pelo espectrorradiômetro HR4000CG-UV-NIR.

### DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE FOTOGERADA

A energia mínima absorvida por uma junção  $p-n$  para o aparecimento da fotocorrente deve ser maior que energia de sua banda proibida  $E_g$ . Através da relação de Planck determina-se a correlação entre a mínima energia necessária ao fóton e o comprimento de onda característico da junção para que os elétrons dos pares criados possam atingir a banda de condução. Entretanto, nem todos os fótons que incidem sobre a célula com energia acima da energia do gap irão dar origem a uma corrente elétrica, pois o estabelecimento da corrente irá depender não só da taxa de geração de portadores, como também da probabilidade de coleta dos mesmos. Na prática, a densidade de corrente foto gerada ( $J_L(\lambda)$ ) é fornecida pela integral, em toda a espessura da célula, do produto entre a taxa de geração de portadores ( $G(x)$ ) e a probabilidade de coleta dos mesmos ( $PC(x)$ ) conforme a Eq. 1:

$$J_L(\lambda) = q \int_0^w G(x, \lambda).PC(x) dx \quad (1)$$

Onde ( $q$ ) é a carga elementar do elétron,  $x$  representa a profundidade onde está considerada a geração e coleta,  $w$  é a espessura da célula (supondo-se que toda a espessura é útil). A taxa de geração de portadores é uma função de ( $\lambda$ ).

Um parâmetro que permite calcular a corrente foto gerada é a eficiência quântica ( $EQ(\lambda)$ ) da célula, normalmente conhecida para células mais convencionais, ou fornecida pelos fabricantes. A eficiência quântica é dada pela relação entre o número de portadores de carga gerados e coletados pela célula solar e o fluxo de fótons, de um dado comprimento de onda, incidente sobre a célula (Eq. 2)

$$EQ(\lambda) = \frac{\int_0^w G(x, \lambda).PC(x) dx}{\phi(\lambda)} \quad (2)$$

Dessa forma, verifica-se que a densidade de corrente foto gerada pela célula pode ser calculada conforme a Eq. 3

$$J_L = q \cdot \int_{\lambda_0}^{\lambda_m} EQ(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

onde  $\lambda_0$  e  $\lambda_m$  são os limites de comprimento de onda considerados. O fluxo de fótons  $\phi(\lambda)$  pode ser facilmente obtido dividindo-se o valor da irradiância espectral incidente  $F(\lambda)$  (medida com o espectrorradiômetro), pela energia de um fóton ( $hc/\lambda$ ), sendo  $h$  a constante de Planck e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. Com isso, conhecidas a composição espectral da energia incidente na célula  $F(\lambda)$  e sua eficiência quântica  $EQ(\lambda)$ , a máxima densidade corrente foto gerada pode ser calculada em  $A/cm^2$  conforme mostrado na Eq. 3.

A célula MJ utilizada nos ensaios tem aproximadamente  $1,0 \text{ cm}^2$  de área e sua estrutura é constituída pelos seguintes materiais semicondutores: Fosfeto de Gálio Índio (InGaP) na junção do topo, Arseneto de Gálio Índio (InGaAs) na junção

intermediária e Germânio (Ge) na junção da base e também como substrato da célula. A Figura 3 apresenta o comportamento da eficiência quântica das três camadas da célula MJ utilizada nos experimentos realizados nesse estudo junto com um dos espectros medidos durante os experimentos. Pode-se observar claramente que cada junção apresenta respostas em regiões distintas do espectro eletromagnético, ampliando, assim, o aproveitamento da radiação solar.

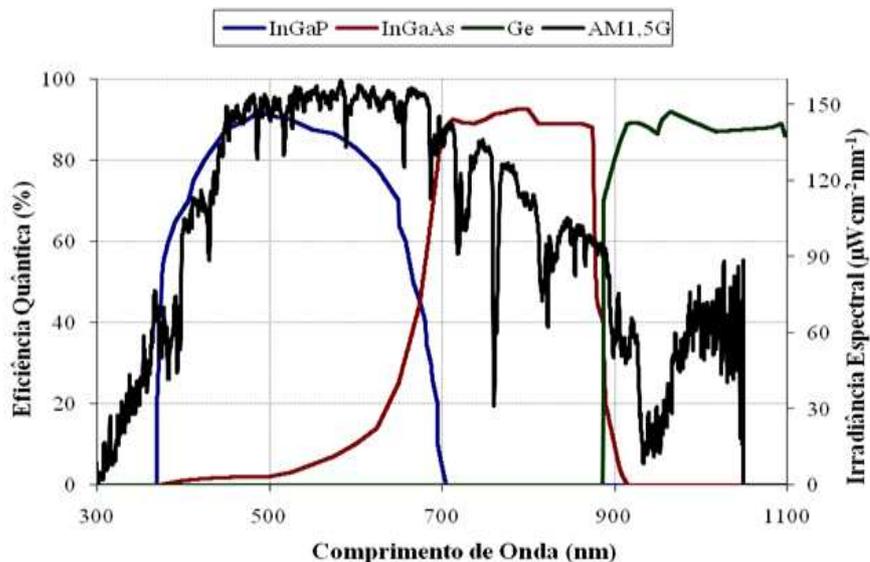


Figura 3: Eficiência quântica da célula MJ obtida através do catálogo do fabricante.

Durante a realização dos cálculos para a estimativa da corrente fotogerada pela célula, para cada espectro medido, obteve-se separadamente a corrente produzida pelas junções superior e intermediária. A razão ( $r_c$ ) entre as correntes geradas por essas subcélulas foi calculada, permitindo definir a junção responsável pela corrente da célula como um todo, ou seja, a célula com menor geração de corrente (Dominguez et al., 2010). A subcélula de germânio não foi avaliada no processo de cálculo da corrente fotogerada, pois a mesma irá normalmente gerar maior fotocorrente que as duas primeiras. Esse comportamento se deve a dois fatores, a eficiência quântica da subcélula de germânio cobre um amplo intervalo do espectro com valores acima de 80%, atuando principalmente na região do infravermelho próximo, região menos afetada pelas variações da massa de ar (Duffie e Beckman, 1991).

#### MEDIDAS DA DENSIDADE DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Para medir a corrente de curto da célula utilizou-se o mesmo dispositivo desenvolvido anteriormente para obter as curvas características (medidas de corrente e tensão). O dispositivo consta de um circuito elétrico composto fundamentalmente pela célula MJ, um “shunt” SH, e um potenciômetro, cuja finalidade é variar os valores de resistência de forma a varrer a curva I-V da célula. Zerando-se a resistência do potenciômetro, obtém-se a corrente de curto. A Figura 4 mostra uma fotografia da célula e do “shunt” utilizado.

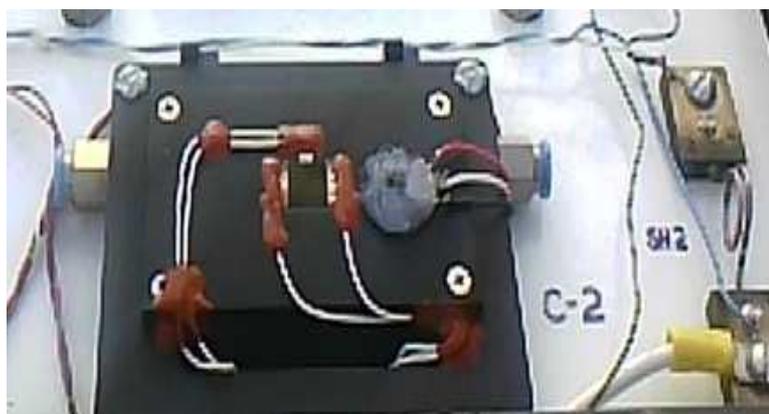


Figura 4: Circuito elétrico mostrando a célula MJ e o “shunt”.

As informações de corrente de curto, juntamente com os valores de irradiância incidente, medida com um piranômetro fotovoltaico (Li-cor) foram coletadas por um sistema de aquisição de dados “micrologger” do tipo CR23X conectado a um computador para o armazenamento dos dados.

A densidade de corrente de curto ( $J_{sc}$ ) foi calculada dividindo-se a corrente de curto medida ( $I_{sc}$ ) pela área da célula.

Para o cálculo da corrente fotogerada, foi necessário determinar a área útil de geração da célula, ou seja, a área não sombreada pelos dedos da grade coletora que irá efetivamente receber os fótons incidentes. Uma observação microscópica da superfície frontal da célula permitiu distinguir a parcela da estrutura responsável pela geração de corrente (semicondutor) da grade coletora. A Figura 5 apresenta uma fotografia microscópica de parte da superfície frontal da célula.

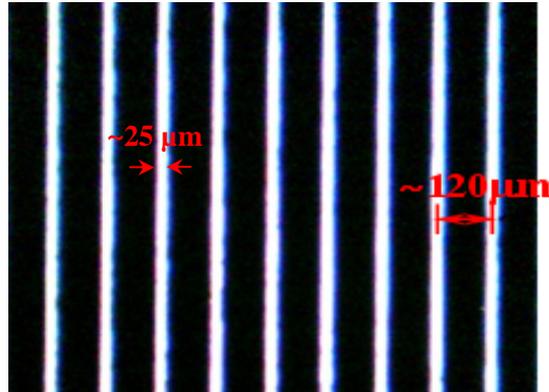


Figura 5: Fotografia microscópica de parte da superfície frontal da célula MJ.

Conforme indicado na Figura 5, a distância entre os centros dos dedos da grade coletora é de aproximadamente 120  $\mu\text{m}$  e a espessura dos dedos em torno de 25  $\mu\text{m}$ . A partir das informações sobre as dimensões da célula disponíveis no “datasheet” (largura e altura) constatou-se que a área dos dedos ( $A_d$ ) corresponde a cerca de 20,8% da área da célula ( $A_c$ ). Com as informações obtidas foi possível estimar o número de dedos presentes na estrutura da célula, da ordem de 84. Esses valores são compatíveis com informações apresentadas na literatura pertinente (Nishioka *et al.*, 2006). Dessa forma o valor efetivo da densidade de corrente fotogerada ( $J_{LE}$ ) foi calculado pelo produto entre a corrente fotogerada máxima calculada (como se toda a célula recebesse irradiância) por um fator de correção de área conforme mostrado na Eq.4.

$$J_{LE} = (1 - A_d/A_c) J_L \quad (4)$$

#### DEFINIÇÃO DA JUNÇÃO LIMITANTE DE CORRENTE NA CÉLULA MJ

A definição da junção que comanda a corrente da célula foi realizada comparando-se a corrente da junção de topo com a corrente da junção do meio, através do fator  $r_c$ . A Figura 6 mostra as densidades de corrente fotogeradas calculadas para as junções do topo e intermediária da célula, bem como os valores de  $r_c$ , ambos em função da irradiância absoluta medida. Cabe salientar que os valores de densidade de corrente fotogerada apresentados não foram corrigidos pelo fator de área e, portanto correspondem ao limite máximo teórico de geração e não à densidade de corrente efetiva.

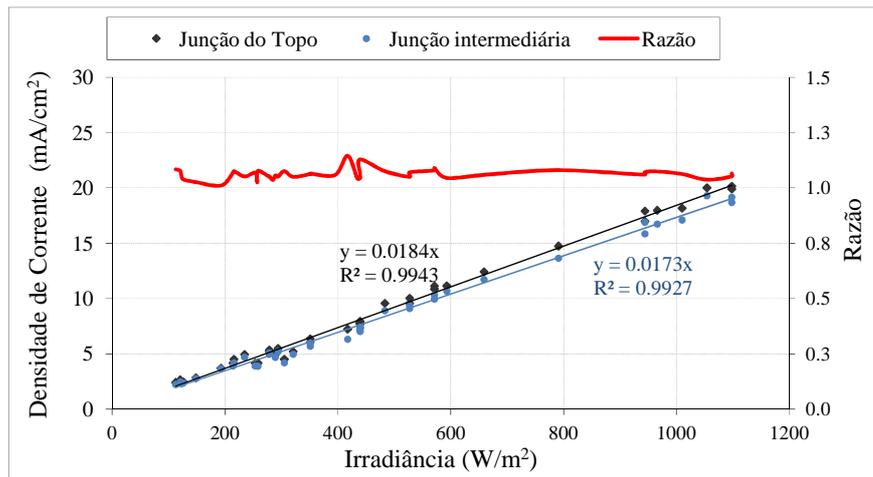


Figura 6: Densidade de corrente fotogerada máxima teórica calculada para as junções do topo e intermediária e razão entre elas em função da irradiância incidente na abertura da célula.

A razão ( $r_c$ ) mostrada na Fig. 6, entre as correntes fotogeradas pela junção de topo e intermediária permite afirmar que dentro da faixa de irradiância avaliada (150  $\text{W}/\text{m}^2$  a 1100  $\text{W}/\text{m}^2$ , aproximadamente), mesmo com valores de bastante próximos (diferença da ordem de 6,4%), a corrente calculada para a junção do topo manteve-se maior que a produzida pela junção do meio ( $r_c$  sempre maior que 1). Em nenhum momento desses ensaios houve a alternância entre as junções intermediária e do topo na limitação da densidade de corrente produzida pela célula. Ou seja, isso corresponde a observar que todos os espectros medidos foram mais ricos na região do comprimento de onda do azul. Dessa forma, a junção intermediária da célula

constituída por Arseneto de Gálio Índio (InGaAs) apresentou-se como limitante da corrente elétrica em todos os experimentos.

### COMPARAÇÃO ENTRE AS DENSIDADES DE CORRENTE FOTOGERADA E DE CURTO CIRCUITO

Na Figura 7 a densidade de corrente fotogerada efetiva é comparada à corrente densidade de corrente de curto. Observa-se que ambas apresentam comportamento linear e são bastante próximas.

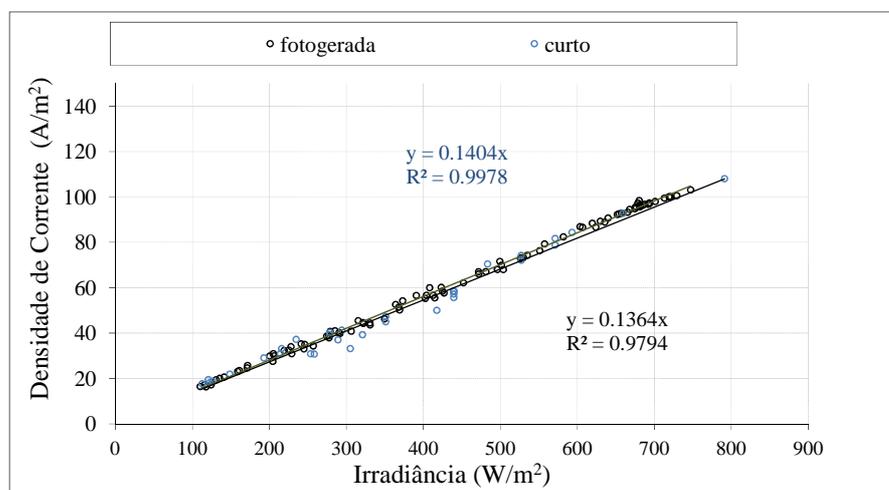


Figura 7: Densidade de corrente fotogerada efetiva e densidade de corrente de curto circuito em função da irradiância incidente sobre a célula.

Comparando-se os resultados das Figuras 6 e 7, verifica-se que o sombreamento causado pela grade coletora representa uma redução em termos de capacidade de geração de 0,179 A/W para 0,136 A/W. A relação A/W para a densidade de corrente de curto circuito medida foi de 0,140 A/W. A diferença entre a corrente de curto e a corrente fotogerada efetiva é insignificante, da ordem de 2,8%.

Uma análise das características internas de geração da célula pode ser realizada com base nas curvas de eficiência quântica e na irradiância espectral. A Tabela 1 mostra as características de energia de gap, corrente fotogerada máxima e potência dissipada por cada uma das junções associadas ou separadamente, bem como a fração espectral absorvida por cada uma delas, calculadas a partir da energia de gap, considerando um espectro AM1,5D.

CARACTERÍSTICAS	JUNÇÃO		
	InGaP	InGaAs	Ge
Energia do Gap (eV)	1,8	1,4	0,7
Corrente (mA)	0,015	0,014	0,021
Potência Teórica Individual (mA.eV)	0,027	0,020	0,014
Fração de Potência Individual	44,1%	32,3%	23,6%
Potência Teórica em Série (mA.eV)	0,027	0,021	0,010
Fração de Potência em Série	46,2%	35,9%	17,9%
Fração Espectral	45,5%	21,3%	27,1%

Tabela 1: Características de potência dissipada e fração espectral absorvida por cada uma das junções da célula para massa de ar 1,5D (850 W/m<sup>2</sup>).

Essa tabela mostra que nessa condição a junção limitante da corrente é também a junção intermediária (InGaAs). Cabe salientar que os resultados obtidos, tanto experimentais quanto os calculados (Tabela 1) correspondem a espectros de irradiância global. No caso de utilização da célula sob concentração, a irradiância difusa, responsável pela maior parte da energia espectral na região do azul não é coletada. Nesse caso, o que se observa é que a junção do topo pode ser a limitante da corrente da célula. Esse comportamento é observado quando se utiliza o espectro AM 1,5 D (850 W/m<sup>2</sup>) para obtenção das correntes fotogeradas na célula MJ. Além disso, esses resultados mostram que a associação das junções em série implica numa perda de mais de 30% da capacidade de geração por parte da junção de germânio, enquanto que a célula como um todo perde apenas 10% de potência quando a associação em série é considerada.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos pela metodologia desenvolvida durante esse trabalho, constatou-se que mesmo com a limitação da faixa espectral do espectroradiômetro empregado para obter as medidas de irradiância espectral esse procedimento conseguiu descrever de forma satisfatória a relação entre as densidades de corrente fotogerada e de curto circuito em função da intensidade de irradiância disponível. Além disso, a variedade de espectros utilizados durante os

ensaios não permitiu que fosse observada a alternância da junção limitante da densidade de corrente estabelecida na operação da célula MJ, bem como foi validada a aproximação entre as densidades de corrente fotogerada e de curto circuito.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo incentivo por meio do fornecimento recursos para a aquisição dos equipamentos e materiais que permitiram a realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS

- Dominguez, C. *et al.*, 2010. Multijunction solar cell model for translating I–V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature. *Progress in Photovoltaics*, 18, pp.272-284.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Green, M. A. *et al.*, 2011. Solar cell efficiency tables (Version 38). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* v. 19, pp.565-572.
- Green, M. A., 1982 *Solar cells*. London: Prentice-Hall International.
- Guter, W. *et al.* Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight. *Applied Physics Letter*, v.94, cap. 223504, 2009.
- King, R.R. *et al.* Pathway to 40% efficient concentrator photovoltaics. In *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Espanha, p. 118–123, 2005.
- King, R.R. *et al.* 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells. *Applied Physics Letter*, v.90, cap. 183516, 2007.
- Krawczynski, M. *et al.*, 2010. Influence of spectral irradiance measurements on accuracy of performance ratio estimation in large scale PV systems. IN *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC) and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC 5)*, Valencia, pp. 4710 - 4714.
- Muniz, H., *et al.*, 2011. Performance analysis of a multijunction solar cell operating under natural conditions and various concentration rates. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 15, pp. 04.105-04.112.
- Nishioka, K. *et al.*, 2006. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems. *Energy Materials & Solar Cells*, v. 90, pp. 1308-1321.
- Tanabe, K. A, 2009. Review of Ultrahigh Efficiency III-V Semiconductor Compound Solar Cells: Multijunction Tandem, Lower Dimensional, Photonic Up/Down Conversion and Plasmonic Nanometallic Structures. *Energies*. 2, pp.504-530.
- Yamaguchi, *et al.*, 2006. Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 90, pp. 3068-3077.

## ABSTRACT

This study aimed to compare the photogenerated current of a multijunction solar cell (MJ) with experimental short circuit current measurements to validate equivalence between them and to define the junction responsible for limiting the electrical current established in cell from evaluation of the ratio between the currents generated ( $r_c$ ) for the top and intermediate junctions. Spectral measurements were performed by a spectroradiometer between 300 nm and 1050 nm. MJ solar cell used on experiments has three junctions composed of indium gallium phosphide, indium gallium arsenide and germanium (Ge). Through irradiance measurements, it was observed that methodology used to compare the behavior of the photogenerated current circuit valid the equivalence of these parameter. Furthermore, sets the intermediate junction InGaAs subcell as limiting the generation of current to spectra obtained, as in all measures  $r_c > 1$ .

**Key words:** Multijunction Solar Cell, Light Generated Current, Spectral Irradiance