

CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE DE CORRENTE FOTOGERADA POR UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA MULTIJUNÇÃO ATRAVÉS DE MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA ESPECTRAL

Helmut Muniz da Silva – helmut@itep.br

Universidade Federal de Pernambuco, Grupo de Fontes Alternativas de Energia
Instituto de Tecnologia de Pernambuco

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Grupo de Fontes Alternativas de Energia

Naum Fraidenraich – naumf@terra.com.br

Universidade Federal de Pernambuco, Grupo de Fontes Alternativas de Energia

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 espectraloradiômetro 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, com 1,0 cm² de área total, mas com uma cobertura decorrente dos dedos de, aproximadamente 19, 5%, conforme observação microscópica de sua estrutura. Dessa forma, a partir das medidas de irradiância entre 200 W/m² e 1200 W/m², aproximadamente, observou-se que a metodologia aplicada para a comparação entre os comportamentos das correntes fotogerada e de curto circuito, em função da irradiância global, valida a equivalência entre esses parâmetros, apresentando capacidades de geração 0,142 A/W e 0,141 A/W, respectivamente. Além disso, define a junção intermediária de InGaAs como subcélula limitante da geração de corrente para os espectros obtidos, uma vez que em todas as medidas $r_c > 1$.

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

1. INTRODUÇÃO

Células solares de multijunção (MJ) têm sido capazes de melhorar consideravelmente a eficiência dos dispositivos fotovoltaicos. Atualmente, a eficiência máxima de conversão está estabelecida em 43,5% por uma célula com 0,3124 cm², 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 os valores de alta eficiência são tangíveis, na prática, tem incentivado o desenvolvimento de pesquisa sobre esse tipo de célula. Portanto, descrever o comportamento dos parâmetros determinantes do funcionamento das células MJ constitui informação relevante para caracterizar seu desempenho sob condições operacionais distintas de irradiância e de temperatura (Dominguez *et al*, 2010).

Para garantir as condições necessárias para controlar os testes e repetir os resultados, os experimentos são geralmente realizados em laboratórios equipados com fontes artificiais de radiação. Contudo, os ensaios sob condições naturais de irradiância fornecem informações relevantes que podem ser usadas para determinar o comportamento real da célula sob condições aleatórias de operação (Tanabe, 2009). Nesse sentido, uma caracterização desse tipo de célula baseada no modelo de um diodo para extração de seus parâmetros característicos tanto sem concentração quanto sob concentração da radiação solar determinou um conjunto de informações importantes sobre o funcionamento desses dispositivos em condições reais de operação (Muniz *et al*, 2011).

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 nesses dispositivos define sua interação com o espectro. Além disso, a utilização de dispositivos de referência durante a realização dos ensaios permite realizar estimativa da degradação desses equipamentos no decorrer de sua utilização (Krawczynski *et al*, 2010).

A relação entre corrente e voltagem em uma célula iluminada é denominada de curva característica e sua descrição se caracteriza pela determinação dos seguintes parâmetros: 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 se

aproxima de zero (curto), o valor estabelecido para a corrente elétrica é assumido como sendo equivalente à própria corrente fotogerada (Green, 1982).

Para validar essa aproximação e definir a junção determinante da corrente gerada pela célula MJ utilizada durante os experimentos, medidas de irradiância espectral sob diferentes condições atmosféricas foram realizadas através de um espectrorradiômetro. Considerando, então, a resposta espectral da célula fornecida pelo fabricante, calculou-se o valor da corrente fotogerada por cada uma de suas junções para definir a junção responsável pela limitação da corrente elétrica.

2. 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: AM 0, AM 1,5G e AM1,5D, cujas nomenclaturas correspondem, respectivamente, aos comportamentos da irradiância incidente na atmosfera e das irradiâncias global e direta sobre a superfície terrestre.

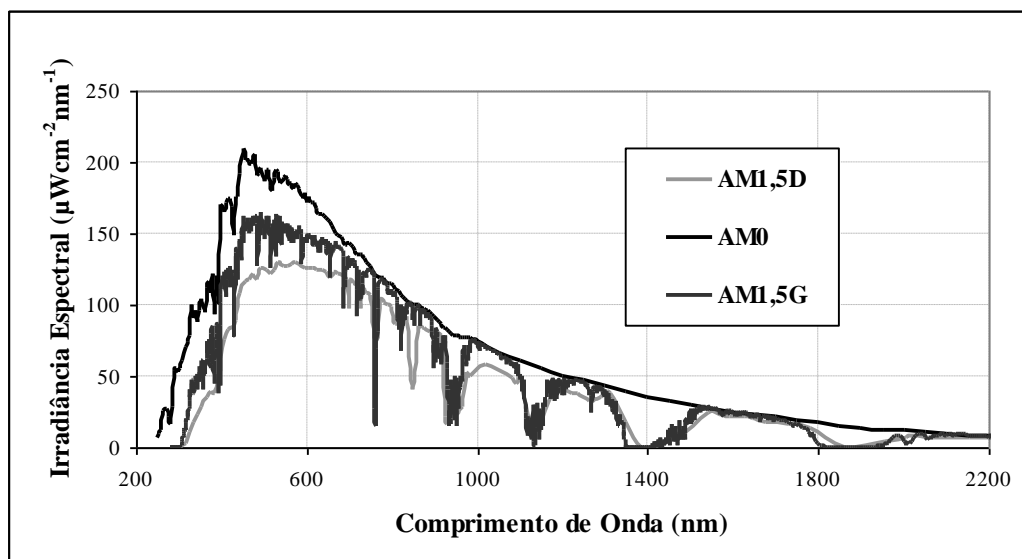


Figura 1– Distribuições espectrais AM 0, AM1,5D e AM1,5G (Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>).

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 da irradiância 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. Esse fenômeno pode ser classificado de três formas distintas. Quando o tamanho da partícula que interage com a radiação é muitas vezes maior que o comprimento de onda ele é denominado espalhamento Rayleigh. No caso contrário em que as dimensões da partícula são muitas vezes menores denomina-se espalhamento não-seletivo. Por último, para dimensões de mesma ordem, chama-se espalhamento Mie. 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 espectrorradiômetro, modelo HR4000CG-UV-NIR, cuja faixa de leitura está entre 200 nm e 1100 nm para realizar a aquisição das medidas espectrais. O funcionamento desse equipamento está baseado na reflexão e na difração da luz, tendo sua calibração executada a partir de um arquivo de referência fornecido pelo fabricante para as fontes luminosas de deutério e halogêneo. Após a calibração do equipamento, foram feitas medidas espectrais em diversas condições de cobertura do céu. 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 Fig. 2 apresenta um conjunto de medidas espectrais para valores de irradiância absoluta contidos no intervalo de 133 W/m² a 1033 W/m².

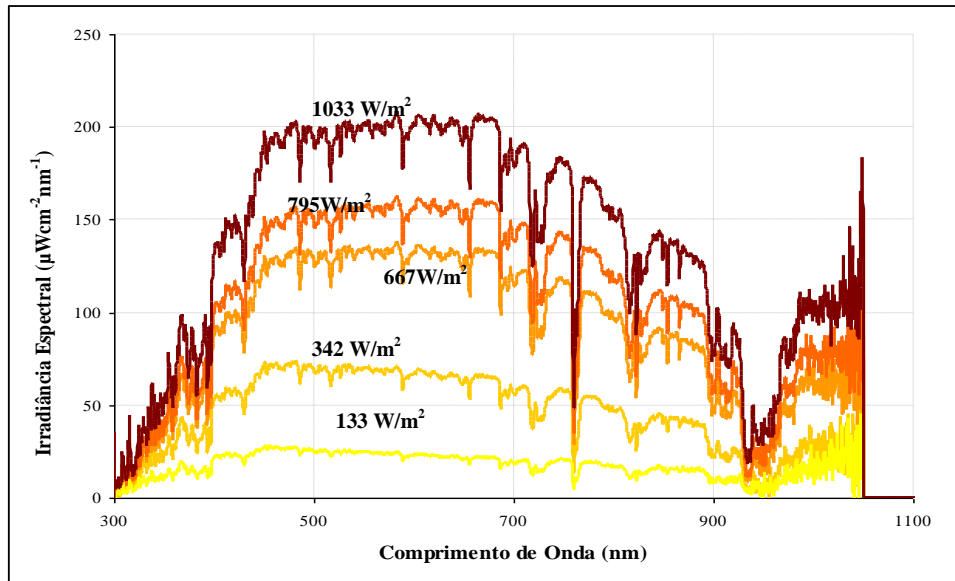


Figura 2 – Medidas de irradiância espectral efetuadas pelo espectroradiômetro HR4000CG-UV-NIR.

De modo geral, o procedimento empregado para obter essas medidas consiste em acessar ao programa, ajustando o tempo de integração da informação gráfica que surge na tela da taxa de contadores por comprimento de onda, de forma a se manter em 85% de seu valor de saturação. Quanto maior a intensidade da irradiância, menor deve ser o tempo de integração para que a medida não sature. Porém, devido à necessidade de padronização das medidas realizadas durante os ensaios para a aquisição das medidas espectrais, adotou-se como padrão para tempo de integração o valor de 50 ms.

3. 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 a fóton e o comprimento de onda característico da junção para que os elétrons dos pares criados possam atingir a banda de condução.

Com isso, a densidade de corrente que pode ser produzida pela célula é obtida assumindo que cada fóton com energia maior ou igual a energia da banda proibida ($E \geq E_g$) dá origem a um portador de carga que circula no circuito externo. Conhecidas a composição espectral da energia incidente na célula $I(\lambda)$ e sua resposta espectral $S_r(\lambda)$, a máxima densidade corrente fotogerada decorrente da absorção de todos os fótons incidentes com energia maior que a energia da banda proibida sobre a célula pode ser calculada em A/cm² como (Green, 1982).

$$J_L = \int_{\lambda_0}^{\lambda_g} I(\lambda) S_r(\lambda) d\lambda = \frac{e}{hc} \int_{\lambda_0}^{\lambda_g} \Phi(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda a partir do qual a junção apresenta resposta, λ_g o comprimento de onda máximo dessa resposta, e é a carga elétrica elementar, h é a constante de Planck e c representa a velocidade da luz no vácuo. Portanto, para um determinado comprimento de onda, o fluxo de fótons $\Phi(\lambda)$, cuja energia é maior que E_g .

As células MJ utilizadas durante os experimentos têm 1,0 cm² 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 Fig. 3 apresenta o comportamento da resposta espectral das três camadas da célula MJ utilizada nos experimentos realizados nesse estudo. Pode-se observar claramente que cada junção apresenta respostas em regiões distintas do espectro eletromagnético, ampliando, assim, o aproveitamento da radiação solar.

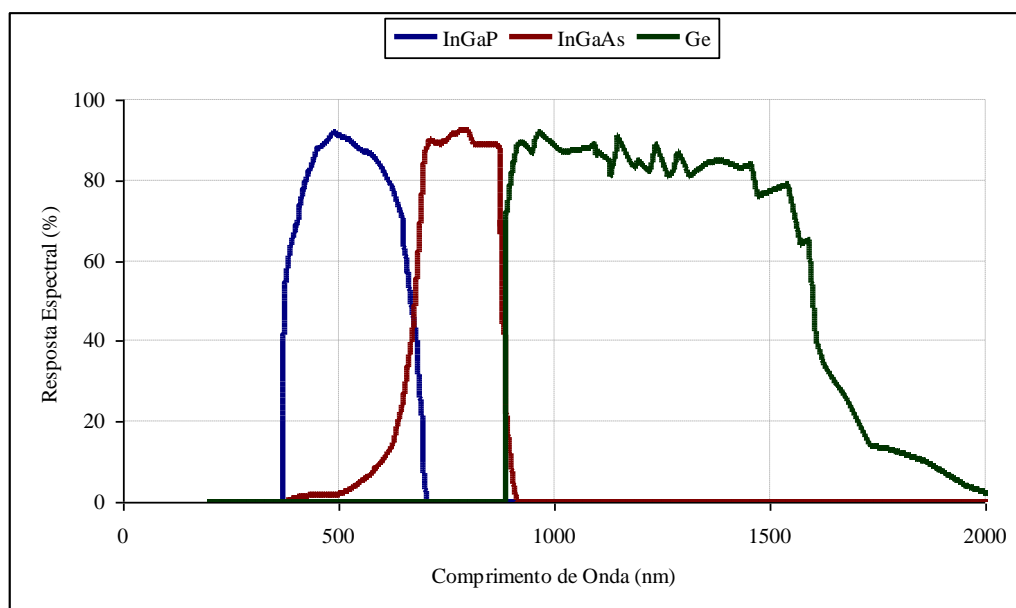


Figura 3 – Resposta espectral da célula MJ fornecida pelo fabricante.

Durante a realização dos cálculos para a estimativa da corrente fotogerada pela célula, obteve-se separadamente a corrente produzida por cada uma de suas junções, determinando-se, assim, a razão (r_c) entre elas para definir a junção responsável por esse parâmetro. A junção de germânio não foi avaliada no processo de definição da corrente fotogerada, pois os baixos valores de corrente apresentados por essa junção foram devidos à limitação da faixa espectral do espectralradiômetro. A Tab. 1 mostra as características de energia de gap, corrente fotogerada e potência dissipada por cada uma das junções associadas ou separadamente, bem como a fração espectral absorvida por cada uma delas a partir da incidência de um espectro AM1,5D.

Tabela 1. Características de potência dissipada e fração espectral absorvida por cada uma das junções da célula para massa de ar 1,5D (850W/m²).

CARACTERÍSTICAS	JUNÇÃO		
	InGaP	InGaAs	Ge
Corrente (mA)	0,0123	0,0125	0,0180
Tensão do Gap (eV)	1,8	1,4	0,7
Potência Teórica Individual (mA.eV)	0,022	0,018	0,013
Fração de Potência Individual	0,420	0,333	0,247
Potência Teórica em Série (mA.eV)	0,022	0,0171	0,009
Fração de Potência em Série	0,418	0,325	0,171
Fração Espectral	0,452	0,221	0,259

Essa tabela mostra que nessa condição a junção limitante da corrente é a de InGaP. Além disso, pode-se observar que a associação das junções em série implica numa perda de mais de 30% da capacidade de geração por parte da junção de germânio, sendo esse um segundo motivo pelo qual essa junção não ser avaliada no processo de limitação de corrente.

4. MEDIDAS DA DENSIDADE DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Para obter as medidas de corrente e tensão, realizou-se a montagem de um circuito elétrico composto fundamentalmente pela célula MJ, um “shunt” SH e um uma fonte elétrica da marca KEPSCO cuja finalidade era variar os valores de tensão para obtenção das curvas características da célula. A Fig. 4 mostra uma fotografia do circuito elétrico composto pela célula MJ junto com o “shunt”.

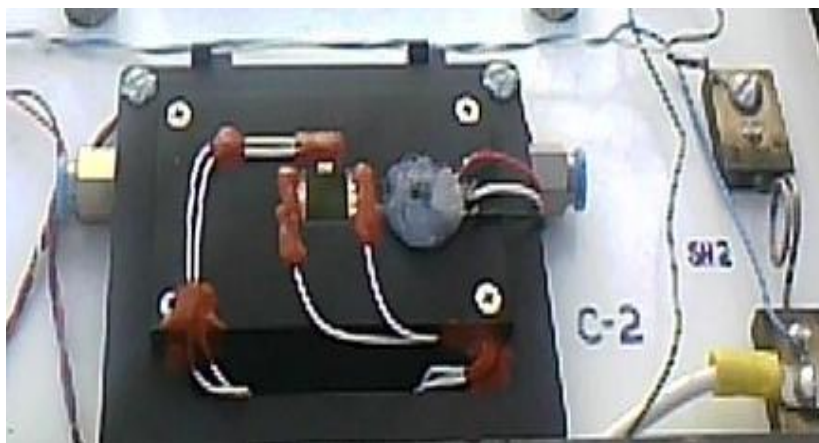


Figura 4 – Circuito elétrico composto pela célula MJ e o “shunt”.

As informações de tensão e corrente geradas durante a realização dos experimentos foram coletadas por um sistema de aquisição de dados “micrologger” do tipo CR23X nos canais (CH) 1 e 2, programado para esse fim, e conectado a um computador para o armazenamento dos dados. A forma de ligação desse circuito é denominada de “técnica de quatro pontos”, cuja principal vantagem é eliminar a impedância estabelecida pela fiação usada para ligação com o sistema de aquisição de dados. A Fig. 5 mostra um esboço do esquema elétrico dessa ligação.

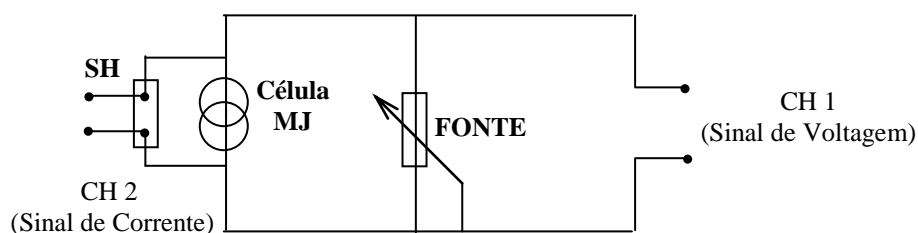


Figura 5 – Esboço do esquema elétrico do circuito através da ligação pela técnica de quatro pontos.

A partir dessa montagem foram tomadas as medidas da corrente de curto (I_{sc}) estabelecida pela célula em função da variação de irradiância sobre ela incidente. Como a área total da célula era conhecida, determinou-se, então, sua densidade de corrente de curto (J_{sc}). Contudo, observou-se ainda uma considerável discrepância entre os valores da corrente de curto e da corrente fotogerada. Tal discrepância demonstrou a necessidade de uma observação microscópica da superfície frontal da célula para que fosse feita a distinção entre a parcela da estrutura responsável pela geração de corrente (semicondutor) e a parte que apenas conduz os portadores de carga pela superfície (dedos). A Fig. 6 apresenta uma fotografia microscópica da superfície frontal da qual se obteve uma estimativa para a grade da célula.

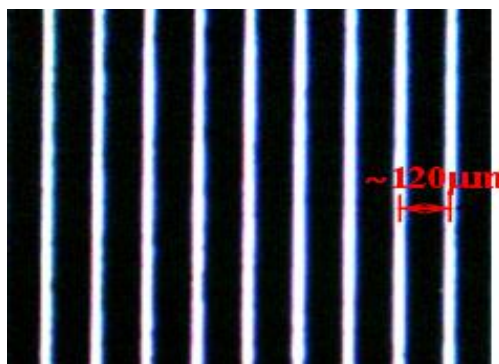


Figura 6 – Fotografia microscópica da superfície frontal da célula MJ.

Com uma grade de, aproximadamente, 120 μm , conforme indicado na Fig. 6, constatou-se que a área dos dedos (A_d) corresponde a cerca de 20,8% da área da célula (A_c). Ou seja, em termos absolutos, estima-se que a espessura dos dedos seja em torno de 25 μm e que são 84 dedos presentes na estrutura da célula. Esses valores são compatíveis com informações apresentadas na literatura pertinente (Nishioka *et al*, 2006). Dessa forma, para estabelecer o valor da

densidade de corrente fotogerada efetiva (J_{LE}), introduziu-se um fator de redução da área responsável pela geração de portadores de carga relacionado com as áreas dos dedos e da célula, ou seja,

$$J_{LE} = (1 - A_d/A_c) J_L \quad (2)$$

A utilização dessa expressão corrigida pelas áreas possibilitou uma melhor aproximação entre os valores das densidades de corrente fotogerada calculados a partir das medidas espectrais e da corrente de curto medidos durante sua operação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Definição da Junção Limitante de Corrente na Célula MJ

A Fig. 7, apresentada a seguir, mostra a tendência linear das densidades de corrente fotogerada pelas junções do topo e intermediária da célula, bem como o valor de r_c calculado em função da irradiância absoluta contida em cada espectro obtido.

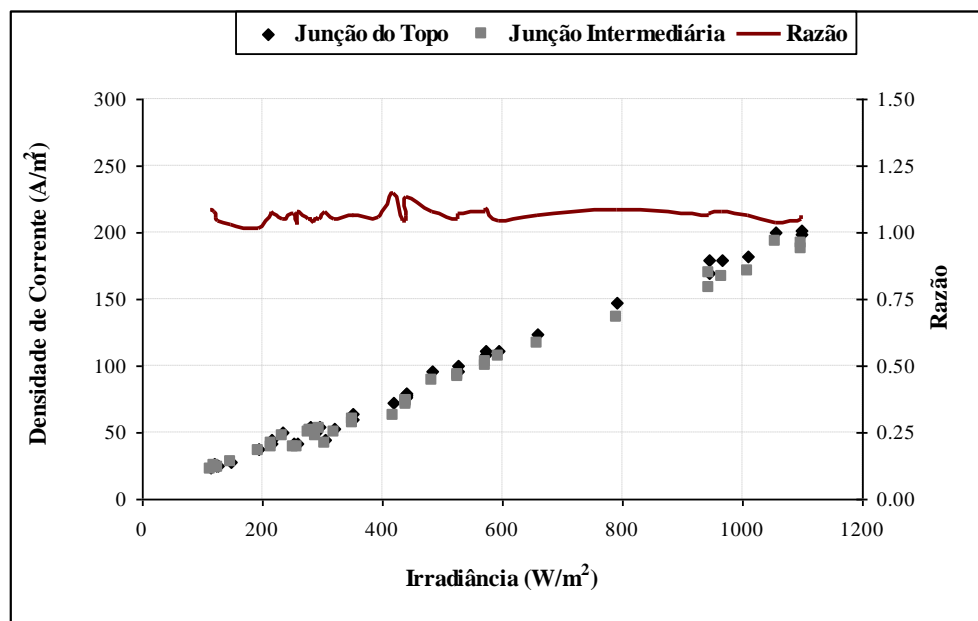


Figura 7 – Densidade de corrente fotogerada pelas junções do topo e intermediária razão entre elas em função da irradiância incidente na abertura do espectrorradiômetro.

Pode-se observar nesses resultados que dentro da faixa de irradiância avaliada (150 W/m² a 1100 W/m², aproximadamente), mesmo com valores de capacidade de geração próximos (0,1842 A/W para a junção de InGaP e 0,1790 A/W para a junção de InGaAs) pelas duas junções, 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 obtidos para os cálculos da densidade de corrente 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.

5.2 Comparação entre as Densidades de Corrente Fotogerada e de Curto Circuito

Após a correção da densidade de corrente fotogerada pela junção limitante de corrente através fator de redução da área de geração conforme apresentado anteriormente, observou-se que o comportamento linear da densidade de corrente fotogerada tende a se aproximar consideravelmente do comportamento da densidade de corrente de curto, conforme a descrição apresentada na Fig. 8.

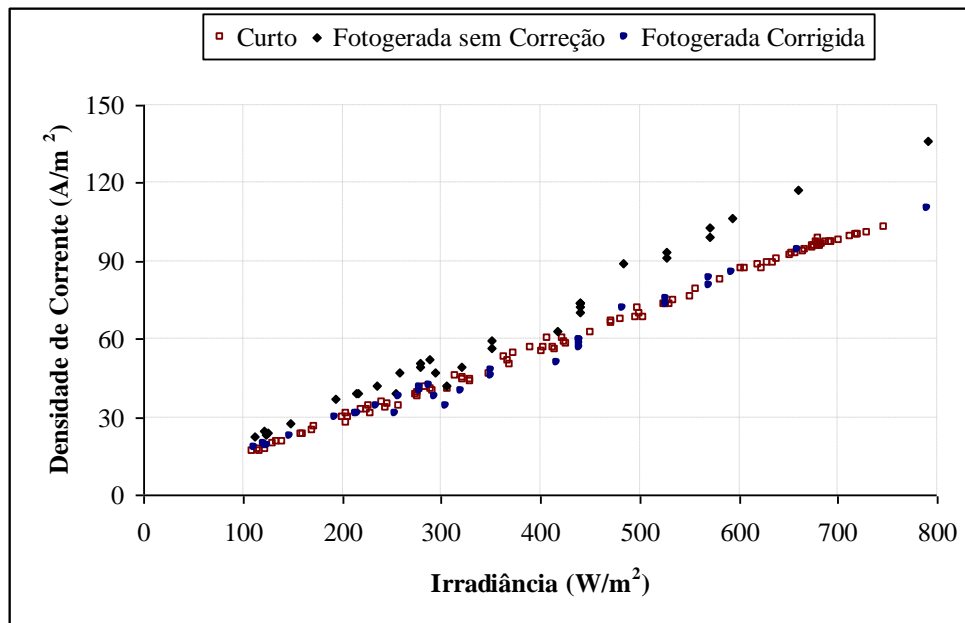


Figura 8 – Densidades de corrente fotogerada com e sem correção pelo fator de redução de área efetiva e de curto circuito em função da irradiância incidente sobre a célula.

A redução da capacidade de geração da corrente fotogerada de 0,1790 A/W para 0,142 A/W através da aplicabilidade do fator de redução da área de geração permitiu validar a aproximação entre as densidades de corrente fotogerada e de curto circuito (0,141 A/W) estabelecidas pela célula MJ avaliada durante os ensaios.

6. 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.

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.
- 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.
- 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.
- 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.

MULTIJUNCTION PHOTOLVOLTAIC CELL PHOTOGENERATED CURRENT DENSITY CHARACTERIZATION THROUGH SPECTRAL IRRADIANCE MEASURES

Abstract. This study aimed to compare the behavior of the photo generated current of a multijunction solar cell (MJ), determined from measurements of spectral irradiance and the spectral response provided by the manufacturer with their experimental measurements of short circuit current to validate equivalence between these parameters and to define the junction responsible for limiting the electrical current established in the cell from the evaluation of the ratio between the currents generated (r_c) for the top and intermediate junctions. Therefore, spectral measurements were performed by using a spectroradiometer for reading spectral range which is between 300 nm and 1050 nm. The cell used for the experiments MJ has three junctions composed of indium gallium phosphide (InGaP) layer on top, indium gallium arsenide (InGaAs) in the intermediate layer and germanium (Ge) at the base with a total area of 1.0 cm², but with a coating resulting from the fingers of approximately 19.5%, according to microscopic observation its structure. Thus, through irradiance measurements between 200 W/m² and 1200 W/m², approximately, it was observed that the methodology used to compare the behavior of the photo generated current and short circuit, in function of the global irradiance, valid the equivalence of these parameters, with capacity for generating 0.142 A / W and 0.141 A / W, respectively. Furthermore, sets the intermediate junction InGaAs subcell as limiting the generation of current to the spectra obtained, as in all measures $r_c > 1$.

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