

MODELAMENTO MATEMÁTICO DO COMPORTAMENTO DE CONVERSORES FOTÔNICOS À MAIORES ENERGIAS QUANDO IMPLEMENTADOS EM CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS DE SILÍCIO

Aline Cristiane Pan – aline.pan@puccs.br

Leandro Santos Grassi Cardoso – leandro-ie@hotmail.com

Fernando Soares dos Reis – fdosreis@puccs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física e Faculdade de Engenharia

Resumo. *Os conversores fotônicos à maiores energias implementados em células solares possuem eficiências de conversão elétrica teóricas muito maiores que às atuais e um preço de produção pretendido muito menor. No entanto, os resultados experimentais na atualidade, não se aproximam aos valores teóricos calculados, pois apresentam pequenos aumentos na fotocorrente ao incorporar o conversor à célula solar bifacial, por exemplo. Por isso, se necessita dispor de uma ferramenta quantitativa para a caracterização de materiais candidatos como conversores fotônicos, que permita realizar análises de sensibilidade da influência de determinados parâmetros e contrastar com os valores reais encontrados. Sendo assim, o objetivo fundamental deste trabalho é desenvolver um modelo matemático para estudar o comportamento dos conversores fotônicos à maiores energias, baseados em parâmetros reais encontrados na literatura, quando implementados em células solares bifaciais de silício. Além disso, se exemplifica este modelo obtendo resultados comparativos (curvas $I \times V$) para diferentes materiais utilizados como conversores fotônicos à maiores energia quando incorporados nas células solares bifaciais de silício utilizando o Programa Unidimensional PCI-D, com a finalidade de buscar os melhores candidatos para serem utilizados.*

Palavras-chave: *Modelamento Matemático, Conversores Fotônicos, Células Solares*

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, as fontes de energias renováveis: eólica, solar, biomassa, geotérmica, maremotriz e hidráulica, se situam em uma posição destacada devido ao esgotamento dos recursos fósseis e aos problemas ambientais. No entanto, a denominação das instalações hidrelétricas como “limpas” está em discussão, pois estudos recentes revelam que a decomposição de matéria orgânica nas áreas inundadas pelos depósitos de algumas destas instalações pode gerar e emitir para atmosfera quantidades significativas de metano e gás carbônico, dois dos gases envolvidos no aquecimento global (Kemenes et al., 2008).

Dentre as energias renováveis, a energia solar mostra-se como uma grande alternativa, pois pode cobrir as necessidades da humanidade de forma inesgotável e pode servir de base para um desenvolvimento sustentável (Moehlecke, 2002). Ao contrário, do que ocorre com outras fontes renováveis como a eólica, a variabilidade do recurso solar é bastante previsível e sua magnitude é calculável a partir da situação geográfica do lugar de onde se instale o sistema. A conversão direta de energia solar em energia elétrica está baseada no efeito fotovoltaico, sendo que o dispositivo que realiza esta conversão é a célula solar, também denominada célula fotovoltaica. Para seu emprego prático, as células solares são geralmente associadas eletricamente em série e encapsuladas. O conjunto de células, conexões e estrutura de proteção denomina-se módulo fotovoltaico. Através destes módulos fotovoltaicos, a energia solar se destaca em relação a outras fontes renováveis por ser simples e rápida de instalar, ser modular e não contaminar o meio ambiente (Homeyer e Ottinger, 1994). Além disso, a modularidade permite aumentar a capacidade do sistema de forma paulatina se houver aumentos elevados, e também é identificada como ideal para sistemas isolados da rede elétrica, a qual poderá satisfazer as necessidades da maioria das pessoas sem eletricidade nos países em desenvolvimento.

O problema primordial que impede uma larga expansão desta tecnologia é econômico, pois necessita-se de todo um investimento inicialmente e a mesma não é subsidiada, como outras formas de energia. Consequentemente, uma das linhas de pesquisa seguida é o desenvolvimento de células solares de alta eficiência e/ou baixo custo. Porém, manter estas duas características em um mesmo dispositivo não é tarefa fácil. Até hoje, nenhum material ou tecnologia foi capaz de atingir completamente este objetivo, pois as células de alta eficiência são demasiado caras e as de baixo custo não alcançam rendimentos satisfatórios (Pan, 2004).

Os conversores fotônicos à maiores energias (*Up Converter* – UC) implementados em células solares possuem eficiências de conversão elétrica teóricas muito maiores que às atuais e um preço de produção pretendido muito menor (Pan et al., 2010). A conversão fotônica à maiores energias (*Up Conversion* – UC) ocorre quando um material é

fotoexcitado a altos comprimentos de onda (baixa energia) e emite fótons a menores comprimentos de onda (alta energia). A absorção de fótons (em duas etapas) abaixo da largura da banda fundamental no UC leva a excitação de portadores desde seu estado fundamental até um nível intermediário no UC, e desde o nível intermediário até um nível excitado superior. Uma parte destes portadores excitados se recombina mediante transições radiativas, que são acompanhadas pela emissão de fótons com energias acima da largura da banda proibida (Strümpel *et al.*, 2007). Quando a energia dos fótons gerados pelo processo UC é maior ou igual ao limite de absorção da célula solar, os fótons gerados no UC contribuem na geração de fotocorrente no dispositivo

Os materiais dopados com íons trivalentes de terras raras (TR^{3+}) são os materiais considerados preferencialmente para serem utilizados como UC pela indústria fotovoltaica (Pan *et al.*, 2014) e devem ser colocados na parte posterior de uma célula solar bifacial para a conversão dos fótons transmitidos, e combinado com um refletor posterior para possibilitar que os fótons de energia mais alta convertidos retornem a célula solar bifacial e possam gerar pares elétron-lacuna.

Para a associação dos UC às células solares é necessário avaliar os parâmetros relacionados com suas propriedades luminescentes. Os mecanismos de transferência de energia (TE) entre os TR^{3+} podem possibilitar fenômenos de conversão a baixas e a altas energias, e o modelo do balanço detalhado é uma ferramenta muito útil para calcular os limites termodinâmicos do funcionamento da célula solar (Luque, 2000). Porém devido às idealizações em estas análises, se torna necessário dispor de outros modelos para avaliar o potencial de melhora na resposta da célula solar com os conversores fotônicos. Para outras aplicações, como lasers e fibras ópticas, foram propostos modelos matemáticos para simular e/ou comparar os fenômenos dos conversores fotônicos desde a década de oitenta (Pollack *et al.*, 1987) (Xie e Rand, 1990). Gamelin e Güdel (2001) realizaram um completo estudo dos principais parâmetros relacionados com os mecanismos de TE para os processos de UC.

O incremento do número de fótons absorvidos devido à incorporação da UC, aumentando a fotocorrente e a eficiência da célula solar foram calculados por Trupke *et al.* (2002). Nestes cálculos teóricos foi considerado uma camada de UC disposta na parte posterior da célula solar bifacial e eletronicamente isolada, isto é, o acoplamento entre UC e célula solar bifacial é produzido puramente de maneira radiativa. O limite de eficiência aportado por esta camada UC é de 38,6% para uma célula de silício baixo uma iluminação não concentrada (1 sol), podendo chegar a um acréscimo de 63,2% para um material semiconductor com energia do *gap* de 1,955 eV e uma iluminação concentrada de 46.200 sóis (limite termodinâmico). Estes valores apresentam uma melhora significativa sobre a eficiência limite de aproximadamente 30% calculada por Shockley e Queisser (1961) para uma célula solar de silício. No entanto, os resultados experimentais na atualidade, (Strümpel *et al.*, 2007), (Shalav *et al.*, 2007), (Pan *et al.*, 2009), não se aproximam a estes valores calculados, pois apresentam pequenos aumentos ao incorporar o UC à célula solar bifacial, por exemplo. Por isso, se necessita dispor de uma ferramenta quantitativa para a caracterização de materiais candidatos como conversores fotônicos, que permita realizar análises de sensibilidade da influência de determinados parâmetros e contrastar com os valores reais encontrados.

Sendo assim, o objetivo fundamental deste trabalho é desenvolver um modelo matemático para estudar o comportamento dos conversores fotônicos à maiores energias, baseados em parâmetros reais encontrados na literatura, quando implementados em células solares bifaciais de silício. Além disso, se exemplifica este modelo obtendo resultados comparativos (curvas $I \times V$) para diferentes materiais utilizados como UC quando incorporados nas células solares bifaciais de silício utilizando o Programa Unidimensional PC1-D, com a finalidade de buscar os melhores candidatos para serem utilizados como UC.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 Mecanismos de Transferência de Energia (TE)

A descrição completa e detalhada dos processos físicos que ocorrem no conversor é muito difícil de realizar com total exatidão. Por um lado, seria necessário conhecer como se distribui os centros luminescentes nos diferentes subníveis energéticos; e por outro, como ocorre a propagação da luz no conversor, e o modo de tratar este fenômeno (Pan, 2009). Considerando estes fatores, neste trabalho buscou-se encontrar a ganância na densidade dos fótons de uma célula solar quando incorporado o UC.

O UC consiste genericamente em uma matriz não absorvente que contém centros luminescentes em uma concentração dada. A absorção e a emissão que resultam da luminescência foi simplificada considerando o centro luminescente como uma série de três níveis de energia.

Diversos mecanismos de TE tem lugar quando é empregado os TR^{3+} em um meio sólido. A maioria destes se relacionam com a absorção e com transições não radioativas (Suyer, 2005). O requisito mínimo para que ocorra estes mecanismos de TE é a presença de pelo menos dois estados metaestáveis. Além disso, para que o fenômeno de UC seja eficiente, estes estados devem ter tempos de vida suficientemente grandes para que os íons consigam participar do processo de luminescência, ou de outros processos fotofísicos com maiores probabilidades de ocorrer em comparação com a relaxação não radioativa (Gamelin e Güdel, 2001).

Os processos mais importantes encontrados para os UC são: absorção desde o estado fundamental (*ground-state absorption-GSA*), absorção desde um estado excitado (*excited-state absorption-ESA*), transferência de energia por UC (*energy transfer up-conversion-ETU*), relaxação cruzada (*cross relaxation-CR*), excitação cooperativa (*cooperative*

excitation-CE) e relaxação cooperativa (*cooperative relaxation-CooR*) (Fig. 1) (Pan, 2009). Estes processos podem combinar-se entre si tornando o efeito de UC mais eficiente. Auzel (2004) chama APTE (addition de photon par transferis d'energie) o processo mais eficaz para os UC, onde 3 íons são envolvidos; dois destes íons são excitados por GSA e transferem sua energia ao terceiro íon por ETU. Este processo é também conhecido por GSA/ETU (Suyer, 2005). O segundo processo mais provável é a absorção do mesmo íon em dois passos, o GSA seguido do ESA (GSA/ESA) (Gamelin e Güdel, 2001), e é este que se utilizou neste trabalho para realizar o modelo matemático. Os demais processos combinados ou isolados possuem uma baixa probabilidade de ocorrer, por exemplo, a probabilidade de CE é 5 ordens de magnitude menos que a do APTE (Auzel, 2004).

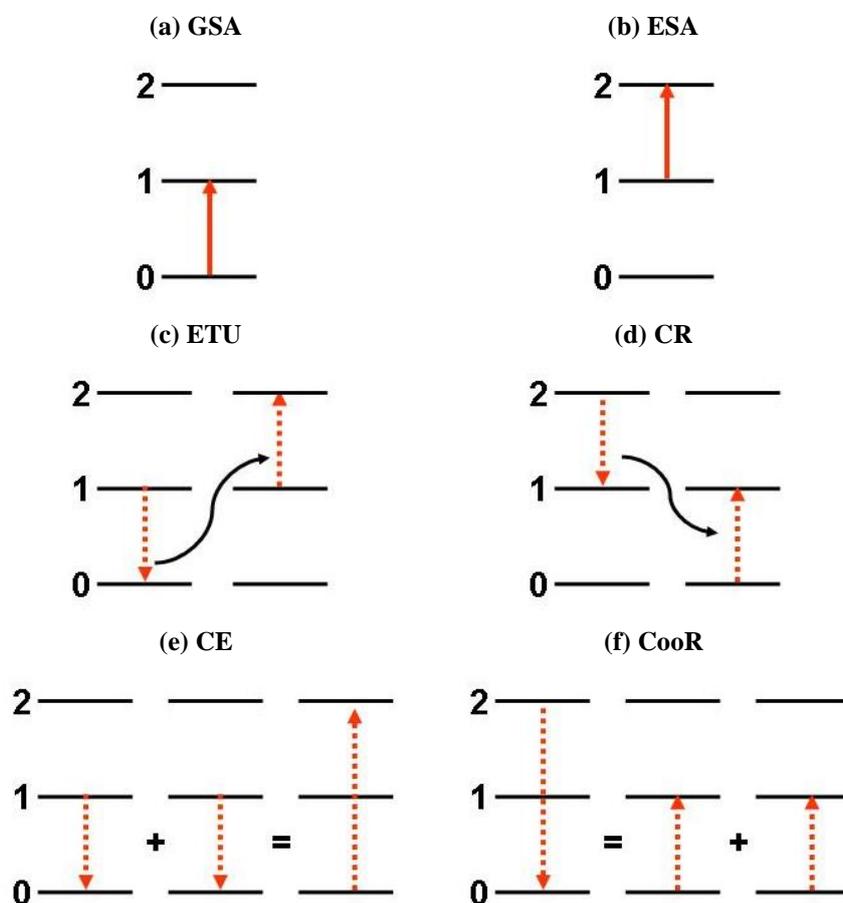


Figura 1 - Processos básicos de TE para os UC para três níveis de energia. As linhas sólidas indicam processos radiativos, e as linhas descontinuas processos não radiativos.

2.2 Obtenção da densidade de potência para os UC

Para a obtenção da densidade de potência para cada intervalo de comprimento de onda, calculou-se inicialmente a energia para este intervalo pela Eq. (1):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, ν é a frequência, c é a velocidade da luz e λ comprimento de onda.

Para o cálculo da densidade do fóton (Φ) no intervalo de comprimento de onda médio ($\Delta\lambda$), Eq. (2), utilizou-se do valor da energia já calculado e dos valores de irradiância (F) tabelados para o espectro solar AM1.5G (Fraas e Partain, 2010). Com os ajustes de unidades obteve-se o resultado em unidade de n/cm^2s :

$$\Phi = \left(\frac{F}{E}\right) * \left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right). \quad (2)$$

O próximo passo foi calcular a densidade de potência para o mesmo intervalo de comprimento de onda, segundo a Eq. (3) em W/cm^2 :

$$H = \Phi * E . \quad (3)$$

Com a Eq. (4) obteve-se a constante de densidade de potência para todos os intervalos de comprimento de onda por meio do somatório de todas as irradiâncias dos fótons arrançadas:

$$C_H = \sum H . \quad (4)$$

Considerando a inserção dos UC, calculou-se novamente a densidade dos fótons para os intervalos de comprimento de onda, porém considerando a radiação que é transmitida. Ou seja, mediu-se a transmitância óptica (T) para uma célula solar bifacial de silício, e adicionou-se estes valores para a Eq. (2), tornando-a na Eq. (3):

$$\Phi = \left(\frac{F}{E}\right) * \left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) * T . \quad (5)$$

Fez-se também novamente o cálculo da densidade de potência para cada intervalo de comprimento de onda, Eq. (3), considerando o UC. Segundo a Eq. (6):

$$H_{UC} = \Phi_{UC} * E . \quad (6)$$

E finalmente, a constante de densidade de potência foi obtido com a inserção dos UC segundo a Eq. (7):

$$C_{UC} = \sum H_{UC} . \quad (7)$$

Nos cálculos pode-se variar a eficiência da conversão utilizando um fator de conversão Eq. (7), e assim variar as eficiências de UC. Para todos considerou-se que a emissão do UC seria exatamente na metade de sua absorção. Pois, teoricamente para que ocorra o fenômeno de UC é necessário que dois ou mais fótons de menor energia se recombinaem em um de maior energia. Logo, utilizou-se desta relação para este modelo, e considerou-se UC de 1000 nm até 2200 nm. Como, por exemplo, para um UC que absorve dois fótons de 1000 nm este irá emitir um fóton de 500 nm com o somatório de todas as densidades a partir de 1000 nm. Esta é apenas uma simplificação inicial, sabe-se que a realidade de cada TR³⁺ e de seu material anfitrião será outra.

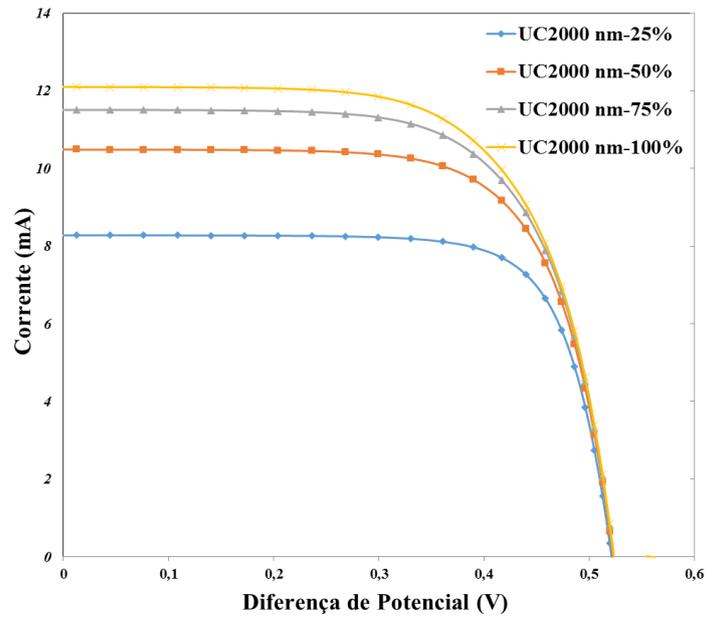
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as aproximações matemáticas desenvolvidas, obtiveram-se tabelas de densidade de fótons por área (W/cm²) para todos os intervalos de comprimentos de onda, entre 300 a 2100 nm, onde estes dados foram inseridos no software que simula células solares unidimensionais PC1D (2008).

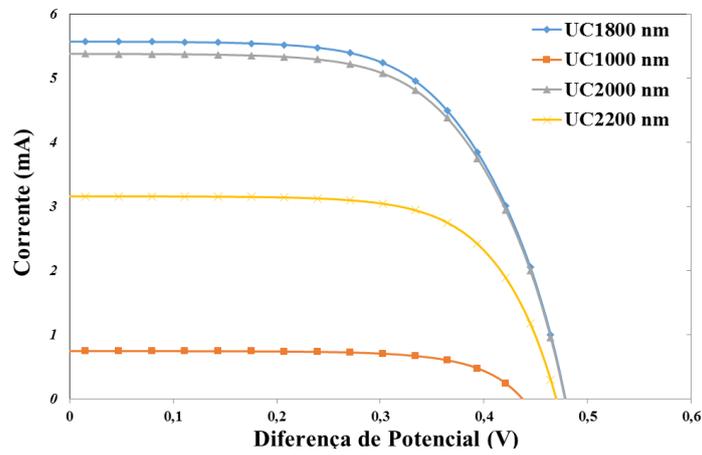
A simulação foi realizada considerando uma célula solar bifacial de silício já caracterizada experimentalmente e com os dados teóricos contrastados (Pan *et al.*, 2007). Foram modificadas as formas de iluminações para esta célula solar considerando as informações dos UC, onde se variou as constantes de intensidades (radiação solar transmitida) e a eficiência da conversão. Com estas simulações, alcançaram-se importantes resultados, como as curvas corrente versus diferença de potencial (I x V) para estas células quando incorporados os UC. Para todos os resultados encontrados o UC de 2000 nm, ou seja, que emite dois fótons de 1000 nm é o que apresenta melhores respostas quando incorporada na célula solar.

A Fig. 2(a) mostra a comparação das curvas I x V do UC de 2000 nm para diferentes eficiências de conversão. Onde se manteve a densidade de potência dos fótons fixa em 0,00208 W/cm², ou seja, considerando que toda radiação solar transmitida (não absorvida) pela célula solar foi absorvida pelo UC e reemitida novamente para a célula solar. Este valor foi utilizado considerando os limites termodinâmicos de uma célula solar de silício cálculos por Shockley e Queisser (2008), onde aproximadamente 21% da radiação solar do espectro AM1,5G é transmitida. Verifica-se uma variação de aproximadamente 40% na corrente elétrica se comparada às concentrações de 25 e 100%, e esta resposta não segue uma linearidade. Quando é observada a variação da concentração de 25% em relação à de 75% percebe-se uma variação na corrente de 32% aproximadamente, e quando comparada a de 50% a diferença chega a 22%. Para um fator de concentração de 75% em comparação com as de 100% e 50% obtêm-se esta variação entre 6% e 10%, respectivamente. Por fim, comparando as concentrações de 100% e de 50% chega-se em uma variação de 16% na corrente elétrica.

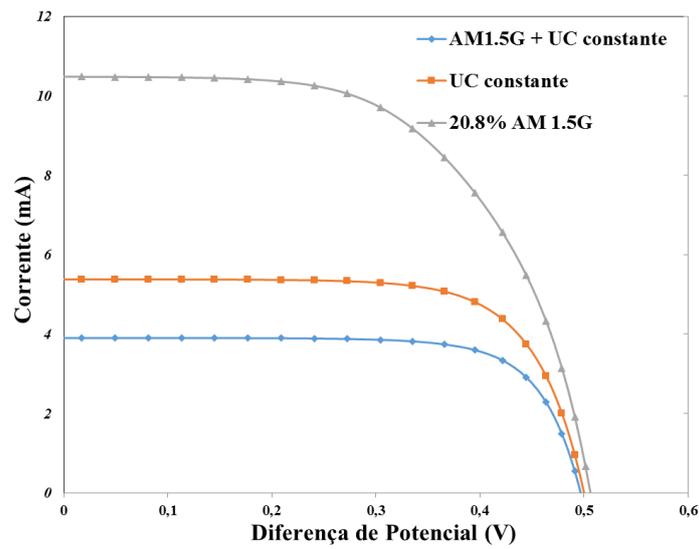
Na Fig. 2(b) utilizou-se a constante de irradiância calculada para cada conversor. Os piores resultados encontrados foram para o UC de 1000 nm. A corrente elétrica para este conversor diminui aproximadamente em 50% se comparada com o de 1800 nm. Entre os UC de 1800 nm e 2000 nm observa-se uma pequena variação, aproximadamente 1%, para suas respostas e são os melhores resultados obtidos. A não linearidade é observada quando é analisado o UC de 2200 nm pois os seus resultados estão compreendidos entre os UC de 1000 nm e 2000 nm.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Curvas I x V obtidas pelo PC1D utilizando as: (a) variações das concentrações do UC de 2000 nm, (b) constantes de irradiação calculadas para os diferentes UC e (c) variações de irradiação para o UC de 2000 nm.

Com a finalidade de analisar os resultados obtidos das radiações emitidas encontradas para os UC e o que foi calculado por Schokley e Queisser (2008) e o AM 1.5G obteve-se o gráfico comparativo (Fig. 2(c)). Usou-se o UC de 2000 nm para esta análise, pois este sempre apresenta as melhores eficiências. Fica evidente que quando se assume que toda a radiação solar que foi transmitida pela célula solar é absorvida pelo UC (20,8%) a corrente elétrica cresce excessivamente, mais que 50%, em comparação com quando é considerado o AM 1.5G e a constante de 0,0107 referente ao próprio UC de 2000 nm, o que seria uma comparação mais realística. Considerando a configuração em que usou-se a constante calculada para o conversor e o AM 1.5G (norma ASTM G173-03) com a constante do conversor nota-se uma diferença de corrente elétrica de 14%. As principais características elétricas, tais como I_{sc} , V_{oc} , FF e η obtidas pelos gráficos da Fig. 2 estão apresentadas na Tab.1.

Tabela 1 - Principais características elétricas geradas pela Fig.2.

	I_{sc} (mA)	P_{max} (mW)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
25%	8,279	3,220	0,5212	74,62	16,13
50%	10,50	4,144	0,5286	74,66	20,75
75%	11,50	4,576	0,5316	74,85	22,92
100%	12,10	4,822	0,5331	74,75	24,15
UC1000	0,7444	0,0224	0,4357	69,06	1,650
UC1800	5,570	2,103	0,5083	74,28	19,22
UC2000	5,379	2,025	0,5074	74,19	19,71
UC2200	3,158	1,133	0,4896	73,28	11,92
AM1.5G	3,901	1,425	0,4965	73,57	13,88
Constante+UC2000	5,379	2,025	0,5074	74,19	19,71
0.0208+UC2000	10,50	4,144	0,5286	74,66	20,75

As eficiências encontradas (~20%) para as células solares com os UC implementados mostram-se abaixo dos valores limites calculado por Trupke *et al.* (2002) (~36%). No entanto, se aproximam dos valores encontrados na prática (~16%) por Fisher *et al.* (2015) e modelado por Gordon *et al.* (2005).

4. CONCLUSÕES

O modelamento matemático do comportamento dos conversores fotônicos à maiores energias, baseado em parâmetros reais encontrados na literatura, quando implementados em células solares bifaciais de silício foi desenvolvido. Além disso, obteve-se resultados similares a de outros autores quando analisadas as características elétricas utilizando o PC1D.

Para todas variações de configurações que se inseriu no PC1D, os conversores fotônicos à maiores energias que atuam absorvendo a radiação transmitida pela célula solar bifacial de silício nos intervalos de comprimento de onda entre 1800 e 2000 nm são os mais apropriados para esta incorporação. Sendo assim, para um futuro desenvolvimento e fabricação de conversores para esta finalidade é proposto buscar materiais que sejam capazes de absorver a radiação nesses comprimentos de onda e tenham também a capacidade de emitir novamente para a célula solar.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projeto Universal 2014, nº 458145/2014-9, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Da mesma forma, pelo Programa de Bolsa/Pesquisa para Alunos da PUCRS (Chamada Geral - BPA/2015).

REFERÊNCIAS

- Auzel, F., 2004. Upconversion and anti-stokes processes with f and d ions in solids, *Chemical Review*, vol. 104, pp. 139-173.
- Fisher S., *et al.*, 2015. Enhanced energy conversion of up-conversion solar cells by the integration of compound parabolic concentrating optics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 140, pp.217–223.
- Fraas, L. M., Partain, L. D., 2010. *Solar Cells and Their Applications*, Wiley, 2ª edição.
- Gamelin, D. R., Güdel, G. U., 2001. Upconversion processes in transition metal and rare earth metal systems, *Topics in Current Chemistry*, vol. 214, pp. 1-56.
- Gordon J., *et al.*, 2005. Optical properties of perfluorocyclobutyl polymers. III. Spectroscopic characterization of rare-earth-doped perfluorocyclobutyl polymers, *J. Opt. Soc. Am. B*, pp. 1654–1659.

- Homeyer, O., Ottinger, R., 1994. Social Costs of Energy: Present Status and Future Trends, New York: Springer, pp. 373-404. Springer-Verlang.
- Kemenes, A., Forsberg, B., Melack, J., 2008. As hidrelétricas e o aquecimento global, *Ciência Hoje*, vol. 41, n. 245, pp. 20-25.
- Luque, A., 2000. Third Generation Photovoltaics and Multiple Band Photovoltaic Conversion, Photovoltaic Olympiac Vision Workshop, Sydney, Austrália.
- Moehlecke, A., 2002. Células Solares Eficientes e de Baixo Custo. Brasília: Prêmio Jovem Cientista e Prêmio Jovem Cientista do Futuro, pp.15-76.
- Pan, A. C., 2004. Processos de fabricação de células solares bifaciais em fornos de aquecimento rápido, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Pan, A. C. Canizo, C., Luque, A., 2007. Thin Bifacial Silicon Solar Cell, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milão, pp. 1438-1442.
- Pan, A. C., Canizo, C., Luque, A., 2009. Characterization of up-converter layer on bifacial silicone solar cells, *Materials Science and Engineering B*, vol. 159-160, pp. 212-215.
- Pan, A. C., 2009. Conversores Fotônicos para Células Solares Bifaciais de Silício, Tese de Doutorado, IES, UPM, Madri.
- Pan, A. C. *et al.*, 2010. Enhancement of up-conversion efficiency by combining rare earth-doped phosphors with PbS quantum dots, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 94, pp.1923–1926.
- Pan, A. C. *et al.*, 2014. Análise Óptica da Implementação de Conversores Fotônicos e Pontos Quânticos em Células Solares Bifaciais de Silício, V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- PC1D,. 2008. Software for modelling a solar cell, Download em: <http://www.engineering.unsw.edu.au/energy-engineering/pc1d-software-for-modelling-a-solar-cell>.
- Pollack, S. A. *et al.*, 1987. Upconversion use for viewing and recording infrared images, *Applied Optics*. Vol. 26, n° 20, pp. 4400-4406.
- Shalav, A., Richards, B., Green, M., 2007. Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: up-conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, pp. 829-842.
- Shockley, W., Queisser, H., 1961. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *Journal of Applied Physics*, vol. 32, n. 3, pp. 510-519.
- Strümpel, C. *et al.*, 2007. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—an overview of available materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, n. 4, pp. 238-249.
- Suyer, J. F. *et al.*, 2005. Novel materials doped with trivalent lanthanides and transition metal ions showing near-infrared to visible photon upconversion, *Optical Material*, vol. 27, pp. 1111-1130.
- Trupke, T., Green, M., Würfel, P., 2002. Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light, *Journal Applied Physics*, vol. 92, n. 7, pp. 4117-4122.
- Xie, P., Rand, S. C., 1990. Continuous-wave, pair-pumped laser, *Optics Letters*, vol. 15, n. 15, pp. 848-850.

MODELING MATHEMATICAL OF THE BEHAVIOR OF UP CONVERTER WHEN IMPLEMENTED IN BIFACIAL SILICON SOLAR CELLS

Abstract. *Up-Converters implemented in solar cells have theoretical efficiencies of the conversion much higher than the actual and a much smaller price production price. However, the experimental results in the present do not approach the theoretical calculated values, because they have a small increase in photocurrent by incorporating the bifacial solar cell, for example. Hence, it is necessary dispose a quantitative tool for the characterization of candidate materials as up-converter, which permits realize an influence sensibility analyzes of certain parameters and contrasts with the real values founded. Thus, the fundamental objective of this work is to develop a mathematical model to study the behavior of up-converters, based on real parameters found in the literature, when implemented in silicon bifacial solar cells. Besides, exemplifies this model getting comparative results ($I \times V$ curve) for different materials used as up-converter when incorporated in silicon bifacial solar cells using the unidimensional software, PCI-D, in order to get the best candidates to be used.*

Key words: *Mathematical modeling, Up-converter, Solar cells.*