

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE CONCENTRADORES EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE HOMOJUNÇÃO

Arthur Vinícius Alves Rabêlo, joaovictoraj@hotmail.com¹
Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, São Cristóvão-SE

Resumo: Viu-se nas últimas décadas um crescente incentivo à produção de energia elétrica pelo uso de fontes renováveis, e dentre elas, o aproveitamento da energia solar é um dos destaques, pelo seu considerado baixo impacto ambiental e diferentes possibilidades de configuração do sistema, além do seu potencial para melhorias. Uma das formas de se captar esse tipo de energia é pelo de células fotovoltaicas, e este trabalho consiste em analisar, por cálculos e análises em software, o comportamento térmico de concentradores fotovoltaicos de baixa concentração, tendo a atenção voltada tanto para os níveis de temperatura atingidos, quanto a sua influência no rendimento das células fotovoltaicas e as devidas soluções a serem exploradas para contornar os problemas emergentes. A concentração dos raios solares, nesse caso, é feita por lente de Fresnel linear, levando a uma problemática mais direcionada. Diante das variáveis aqui abordadas, foi possível observar, por exemplo, que a temperatura de uma célula fotovoltaica pode atingir 200°C, a depender das condições, e que anexá-las a um sistema de resfriamento passivo por aletas pode fazê-la cair para temperaturas menores que 60°C. Nessas condições, células de homojunção com trilhas finas ou sem trilhas na parte frontal podem ser utilizadas para o aproveitamento da energia solar.

Palavras-chave: Concentradores Fotovoltaicos, Dissipação Térmica, Rendimento

1. INTRODUÇÃO

Pode-se perceber nas últimas décadas, um aumento bastante significativo no uso de energias renováveis para a produção de energia elétrica, e a energia solar é um dos principais destaques, em âmbito mundial. Diferentes técnicas para seu aproveitamento vêm sendo desenvolvidas, inclusive melhorias quanto ao uso de células fotovoltaicas (FV), que permitem converter diretamente energia solar em elétrica. Uma das formas de se aumentar o potencial delas é pelo uso de concentradores, seja por lentes ou espelhos. Segundo Viana (2010), existem regiões no Brasil em que a irradiação direta é até 20% superior que a irradiação total no plano inclinado. Isso ocorre no oeste dos estados do Sul do país. No oeste da Bahia, tem-se uma irradiação direta de até 10% superior e um valor absoluto superior de até 2300 kWh/m²/ano, região especialmente interessante para instalação de geração heliotérmica. Na Fig. 1 é mapeada a quantidade de energia que pode ser gerada por esses sistemas para cada localidade, destacando os locais que apresentam uma geração anual maior que 1800 kWh/kW_N (ou irradiação direta normal maior que 1800 kWh/m²/ano). Isso porque esse é o valor acima do qual torna-se mais viável a aplicação desse tipo de sistema, segundo estudos feitos na Espanha, em condições solarimétricas semelhantes às brasileiras.

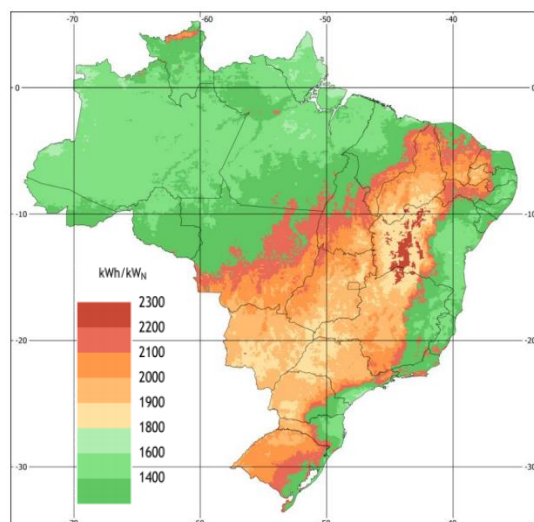


Figura 1. Mapa de geração total anual estimada para sistemas fotovoltaicos com concentrador. Fonte: Viana (2010).

Nessas regiões, portanto, pode-se propor a concentração de energia solar para a produção direta de energia elétrica (concentradores fotovoltaicos) ou como fonte em ciclos termodinâmicos (energia heliotérmica, em que a energia solar é primeiramente transformada em energia térmica). Com o uso de concentradores e células FV de alto desempenho, foi possível chegar à maior eficiência já registrada até então, de 46%, segundo dados da NREL (2015). Para entender o que esse recorde significa, seria necessário construir coletores solares que operassem a 1500°C com 77% de eficiência, acionando ciclos combinados de terceira geração, para atingir esse nível de eficiência na conversão da irradiação solar em eletricidade. Esse fato mostra a importância de se estudar a concentração em células FV. Sabe-se da necessidade de se trabalhar a altas concentrações (acima de 300 X), com células FV de multijunção e ótimos sistemas de resfriamento ativo. Como alternativa de baixo custo, este artigo se propõe estudar o efeito da baixa concentração em células de homojunção.

Seja a concentração feita a baixos ou altos níveis, a célula FV sofrerá um aumento de temperatura. De quanto será esse aumento, dependerá também das condições a que a célula estará sujeita. De qualquer maneira, isso terá algum impacto na eficiência da célula, e, como mencionado anteriormente, surge a necessidade de se usar dissipadores de calor, que podem ser passivos ou ativos.

Resfriamento passivo para células FV envolvem, basicamente, princípios aerodinâmicos para canalizar um fluxo de ar pelas células. Existem diversas maneiras de se utilizar esse tipo de resfriamento, sendo as mais simples envolvendo o uso de materiais de alta condutividade térmica e aletas, de acordo com a aplicação. Já os sistemas de resfriamento ativo precisam de outros dispositivos, como bombas e trocadores de calor, aumentando o custo, mas possibilitando maiores taxas de transferência de calor e mesmo outras funções para o dispositivo, como cogeração (Maghanga, 2012).

2. METODOLOGIA

Para a concentração em si, será usada para as análises uma lente de Fresnel linear em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Mecânica (DMEC) da Universidade Federal de Sergipe (Santos, 2015), conforme mostrada na Fig. 2. As lentes de fresnel funcionam como uma lente plano-convexa, só que com uma ou ambas as superfícies modificadas de tal maneira que se consiga o mesmo foco de uma lente convencional equivalente com o uso de menos material. Ou seja, consegue-se o mesmo efeito reduzindo, de pouco a muito, o volume e o peso da lente.

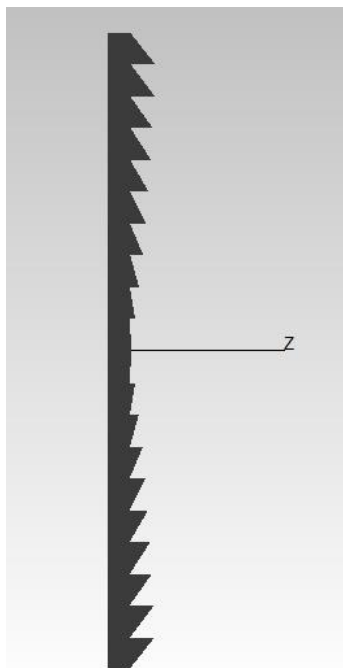


Figura 2. Modelo da lente de Fresnel abordada.

Com os dados e dimensões da lente, pode-se obter, através de software, a distribuição da irradiação convergida para a célula. Para tanto, foi usado o TracePro, software que, dentre outras funções, analisa a trajetória da incidência de raios, usando o método estatístico de Monte Carlo. Com os resultados dessa simulação, foi possível estimar a temperatura atingida pela célula sob as condições de irradiação e ambientes, por meio de cálculos de transferência de calor adimensional e também dimensional por elementos finitos, buscando maior confiabilidade nos resultados encontrados.

Basicamente, os cálculos iniciais da transferência de calor envolvem convecção e radiação. Vale ressaltar que, quanto à convecção, fenômeno expresso pela *lei do resfriamento de Newton*, um importante e complexo fator que é necessário ser estimado é o coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Ele depende de todas as variáveis que influenciam esse modo de transferência, como o tipo do fluido e suas propriedades, e a geometria e disposição da superfície do sólido (Çengel, 2002). A depender de como tratemos o ar ambiente, se com velocidades consideráveis do vento ou não, o modo como se estima o coeficiente de convecção h muda, pois, com vento, pode-se tratar o problema como convecção forçada, mas com velocidade praticamente nula, usa-se a abordagem da convecção natural. As duas abordagens foram utilizadas, sempre considerando que o fenômeno ocorre em uma placa plana e, para o caso de se considerar a velocidade do vento, regime turbulento. Para o dimensionamento, poderia-se usar apenas os cálculos para convecção natural, a fim de se trabalhar com os piores casos, porém se quis também analisar o comportamento de outras maneiras, e perceber melhor as variações que podem ocorrer na célula.

Como dito anteriormente, com os dados da temperatura da célula, é possível estimar qual o impacto esse aumento trará para a célula. A Equação (1) é uma fórmula empírica que permite fazer essa estimativa, desenvolvida por Evans e Florschuetz (1977), e muitas das fórmulas também usadas nesse âmbito foram baseadas na aqui apresentada, e fornecem resultados similares, segundo Skoplaki (2008).

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (1)$$

Nessa fórmula, dois fatores são constantes fornecidas pelos fabricantes, que são o β_{ref} e o η_{ref} , obtidos experimentalmente; T_{ref} é justamente a temperatura de referência para estes testes, e T_c é a temperatura em que a célula se encontra. O β_{ref} é o *coeficiente de temperatura* (K^{-1}), fator que influencia diretamente no quanto a célula tem o seu rendimento alterado, face ao seu funcionamento numa determinada temperatura, e η_{ref} é o rendimento de referência, ou nas “condições padrão de teste”.

Referente a células à base de silício, os valores mais baixos para β_{ref} são os da célula de silício amorfo (a-Si), e foi essa a escolhida para os estudos subsequentes. Por conta desses baixos valores, esse tipo de célula irá sofrer variações de desempenho em menor intensidade. De fato, células de silício amorfo têm melhor performance em altas temperaturas quando comparadas a outros tipos de células fotovoltaicas à base de silício. Há, até mesmo,

casos em que foram obtidos coeficientes de temperatura positivos, para algumas dessas células, dentro de uma certa faixa de temperatura, de 25°C à 60°C, segundo experimentos desenvolvidos por Carlson et al. (2000). Em contrapartida, estas normalmente possuem menor eficiência, hoje em torno de 10%.

Visto que esse aumento na temperatura é prejudicial para o desempenho da célula, busca-se, então, resfriá-la. Como se trabalhará com baixas concentrações, optou-se por utilizar resfriamento passivo, feito com aletas retangulares. Como parâmetro para a temperatura de trabalho da célula fotovoltaica, procurou-se, nesse estudo, fazer a célula solar funcionar a uma temperatura de até aproximadamente 60°C, pois essa é a temperatura que um painel solar comum, sem uso de concentradores, normalmente pode atingir em dias ensolarados de verão (Carlson et al., 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como base para irradiação solar a ser concentrada, foi considerada uma incidência de 1000 W/m² sobre a lente de Fresnel, justamente porque essa é normalmente a maior irradiação direta que se incide numa superfície.

Usando-se a lente projetada, se for incidida uma irradiação de 1000 W/m² sobre ela, a célula que se encontra em seu foco (aprox. 255mm) estaria sujeita a uma concentração de aproximadamente 20X. A Figura 3 mostra o resultado obtido para essa condição. O padrão da Fig. 3-a mostra por cores a variação do nível de radiação incidente na célula, com sua escala à esquerda. Pode-se ver as duas linhas alaranjadas, delimitando a região da célula FV que, nesse caso, vai de, aproximadamente, 10 mm a -10 mm no eixo y, seguido de 38,1 mm a -38,1 mm no eixo x. Além disso, abaixo da zona colorida, o programa mostra informações importantes para o estudo, como o mínimo e máximo de irradiação incidente, bem como a média e o fluxo total recebido (em W, pois já leva em conta a área).

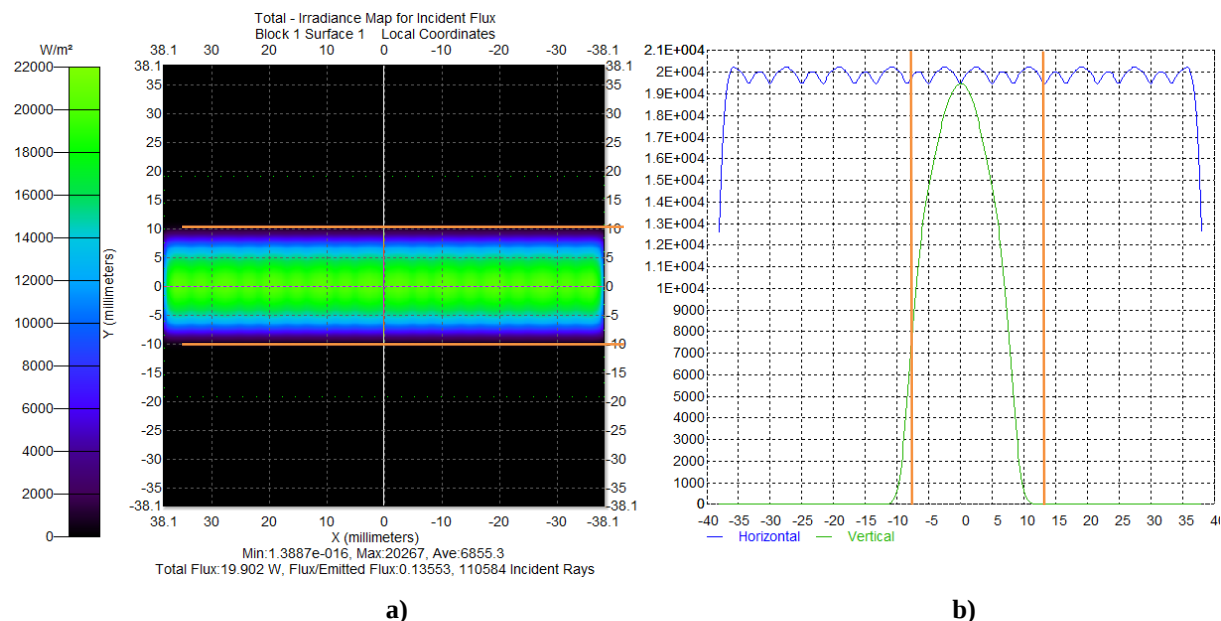


Figura 3. Análise da convergência dos raios numa célula a 255 mm. Em b, a abcissa mostra a distância [mm] do centro e a ordenada é a irradiação incidente [W/m²].

Na Figura 3-b, encontra-se um gráfico que mostra aquela variação de maneira um pouco mais precisa: a partir de um ponto escolhido (no caso da figura, $x=y=0$, ou o centro do retângulo), vê-se por curvas como o nível de radiação varia ao se seguir os eixos x (em azul) e y (em verde) da célula. Ou seja, a curva dita horizontal (azul) mostra o padrão de irradiação longitudinalmente, enquanto que a curva vertical (verde), transversalmente.

Apesar de se conseguir aquele nível de concentração, a imagem mostra que os raios solares não se distribuem bem por toda a célula. Observa-se uma variação acentuada já a partir do centro e uma pequena porção dela praticamente sombreada. Como num circuito em série, essa porção irá limitar a corrente total produzida pela célula, ocasionando uma perda da sua eficiência. Ou seja, se se focar na faixa que vai de 10mm a -10mm, observa-se que a irradiação vai de 20 kW/m² no centro a aproximadamente zero, nos cantos, e uma célula nestas condições irá operar como de estivesse sombreada. Para contornar esse problema e fazer com que os raios solares atinjam toda ou uma maior parte da célula de maneira mais uniforme, passou-se a posicioná-la a 245 mm. O resultado com essa modificação é mostrado na Fig. 4.

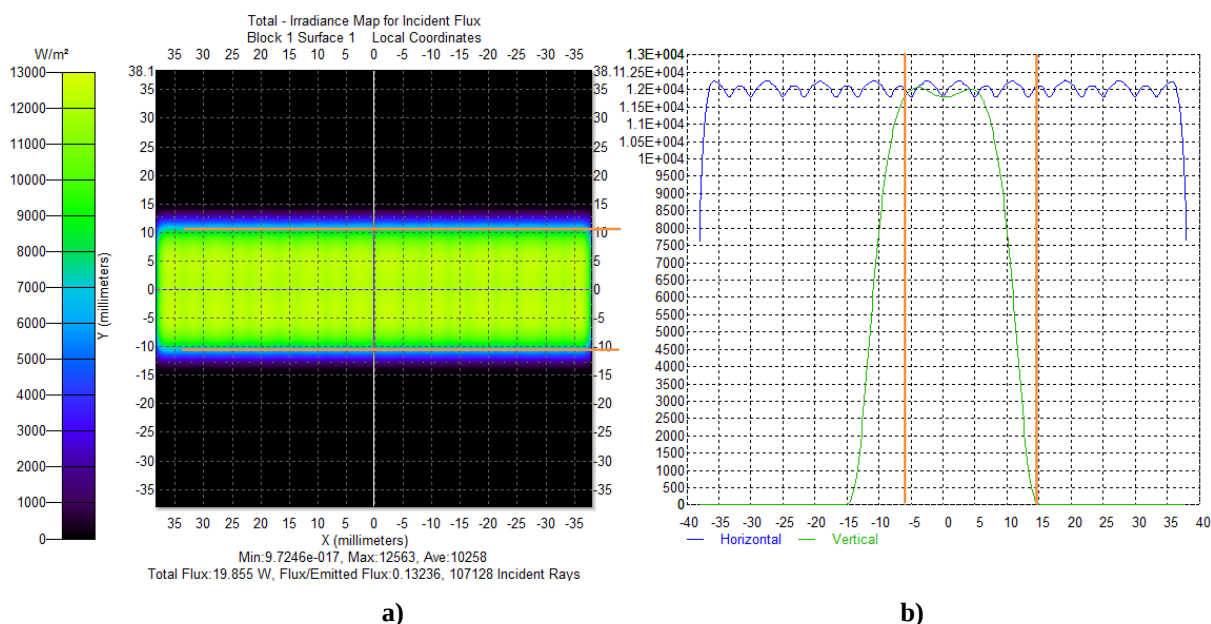


Figura 4. Análise da convergência dos raios solares a 245 mm. Em b, a abscissa mostra a distância [mm] do centro e a ordenada é a irradiância incidente [W/m²].

Dessa forma, percebe-se que os raios solares se concentram mais uniformemente sobre maior parte da célula, em comparação com a configuração anterior, não havendo, também, zonas não iluminadas. De -10 a +10 mm se tem uma variação de 8 a 10 kW/m² dos cantos ao centro da célula, variação esta considerada aceitável. Observa-se, entretanto, que o pico de irradiância incidente cai para aproximadamente 40% do valor de irradiância obtida no foco da lente. Apesar disso, o fluxo total conseguido, é em torno do mesmo valor que se consegue com a outra configuração. Assim, para um melhor desempenho, optou-se pelo uso de uma célula nessa nova distância (245 mm). Com isso, a irradiância incidente nas células será de uma média de aproximadamente 10000 W/m², como informado pela análise na Fig. 4.

3.1 Análise térmica

Para o cálculo da temperatura da célula sob a irradiância de 10000 W/m², é possível se usar apenas essa média, sem a necessidade de considerar o padrão exato que foi gerado pelo TracePro, por causa da razoável uniformidade de irradiância incidente sobre a superfície da célula FV (conseguida pela sua aproximação à lente), e pelo fato dela ser de pequena largura e não ter comportamento térmico isolante (características que permitem supor um rápido alcance ao estado quase-permanente).

Quanto às condições ambiente para as análises, considerou-se de início uma situação em que o vento sopra a uma baixa velocidade de 3 m/s e com uma temperatura de 30 °C (e obtendo-se um coeficiente de convecção de 24 W/m²K), comum em muitas regiões do Brasil. Assim sendo, pela abordagem da convecção forçada em placas planas, teve-se que a temperatura da célula atingiria 164°C. O resultado da análise em software (ANSYS® Steady State Thermal) é mostrado na Fig. 5, e percebe-se apenas uma pequena diferença entre os valores, devido, principalmente, ao gradiente dimensional da temperatura.

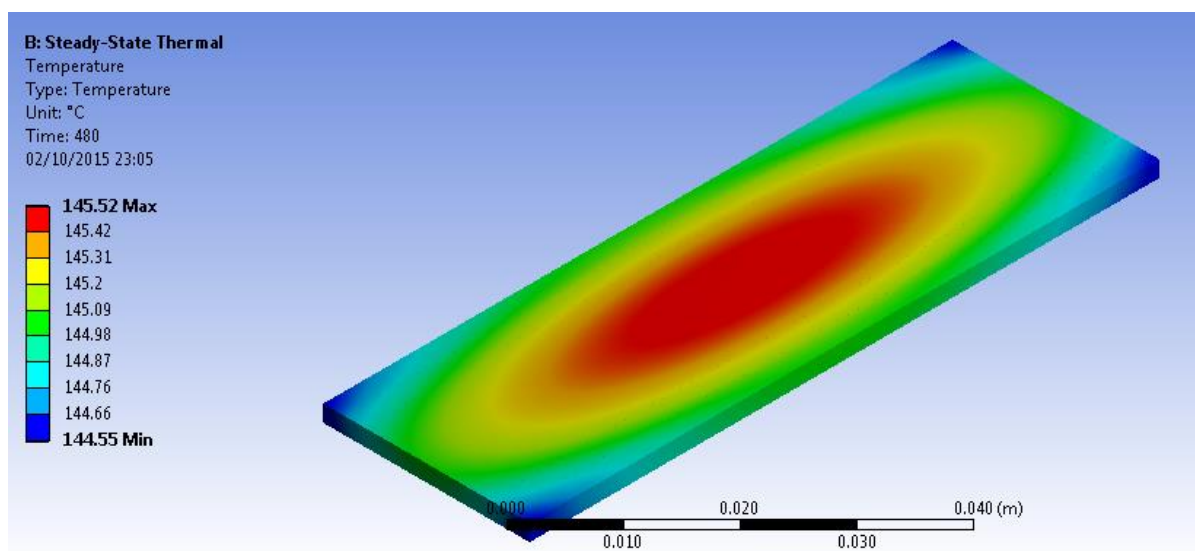


Figura 5. Resultado da análise em software para a célula sob irradiação de 10000 W/m^2 a 30°C e h_c de $24 \text{ W/m}^2\text{K}$

Agora, considerando uma situação mais adversa, em que o ar está “parado” e em um dia com temperatura média de 35°C , percebeu-se que a célula atingiria uma temperatura de 206°C . Vale ressaltar que, nesse caso, a abordagem usada foi a de convecção natural, obtendo-se um coeficiente de convecção de $14 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Voltando ao caso anterior, foi analisada, então, a queda no rendimento da célula provocada por esse aumento de temperatura. Em relação ao uso de uma célula de silício amorfo, ela possui um coeficiente de temperatura (β_{ref}) por volta de 0,0011, de acordo com Skoplaki (2008). Com esse valor e considerando o rendimento de referência (η_{ref}) de 10%, o rendimento que a célula FV cai para 8,5%. Em uma célula de silício monocristalino, o rendimento sofreria uma diminuição de 57%. O mais grave é que o EVA ou outro polímero utilizado no encapsulamento não suportaria a temperatura de 164°C . Para garantir uma boa eficiência e a integridade dos materiais, procurar-se-á manter a célula funcionando a temperaturas de até 60°C .

2.1.1. Resfriamento passivo da célula.

O modelo proposto de dissipador térmico (*heat sink*) para o resfriamento passivo é composto de 14 aletas de 6 cm de largura, 4 cm de comprimento e 2 mm de espessura, afastadas 4 mm umas das outras. O uso desse dissipador fez com que a temperatura da célula caísse de 206°C para 60°C (naquele caso ambiente sem brisa de vento e com 35°C), e de 164°C para 40°C (no caso de a célula estar sob uma brisa leve e temperatura ambiente de 30°C). O resultado obtido em software para este último caso é apresentado na Fig. 6. Segundo os cálculos feitos e confirmados pela análise numérica por elementos finitos, a eficiência da célula é de aproximadamente 95%.

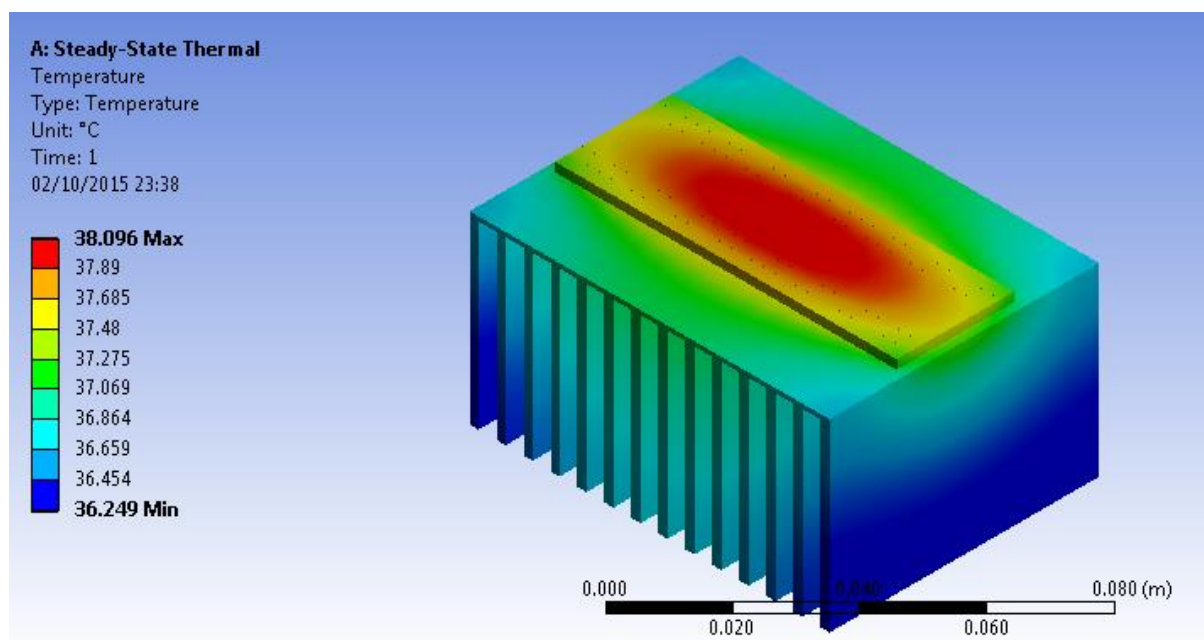


Figura 6. Análise térmica da aleta sob temperatura ambiente de 30°C e h_c de 24 W/m²K.

Ao se permitir levar a célula a funcionar a temperaturas maiores, o sistema de aletas também permite que a célula seja sujeita a maiores concentrações. Nessa etapa, foram realizados os cálculos para o caso de se ter a célula sujeita ao ambiente que a levou a 206°C. Considerando-se, agora, 100 °C como o limite de temperatura de operação da célula FV, por conta de resultados obtidos por experimentos realizados com células à 100°C (Pathak et al., 2012), tem-se que o sistema de resfriamento aqui proposto possibilita que a célula esteja sujeita a concentrações de até 35X.

Como resultado, pôde-se traçar curvas a diferentes concentrações em função do coeficiente de convecção, conforme mostram a Fig. 7 e a Fig. 8.

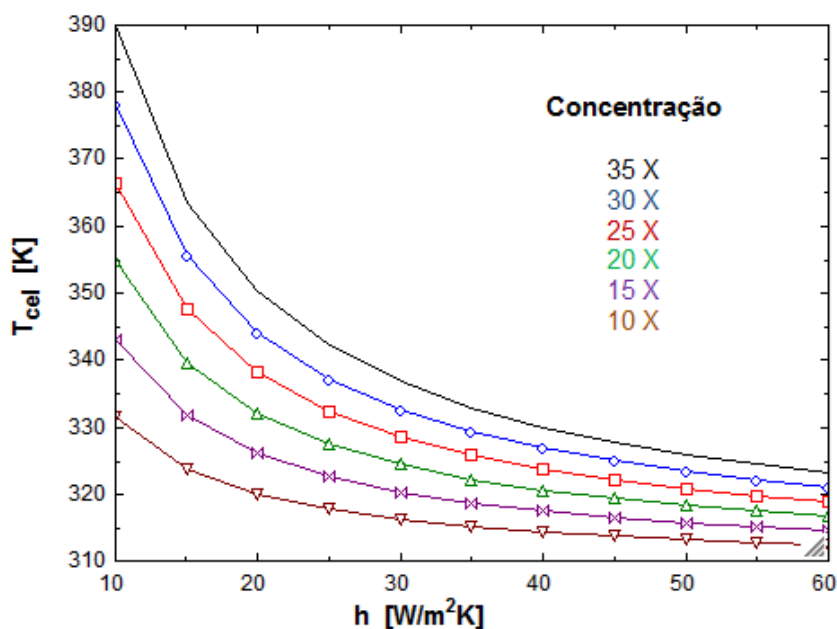


Figura 7. Temperatura da célula X coeficiente de convecção para diferentes concentrações. De baixo para cima, tem-se 10X, 15X,...,35X.

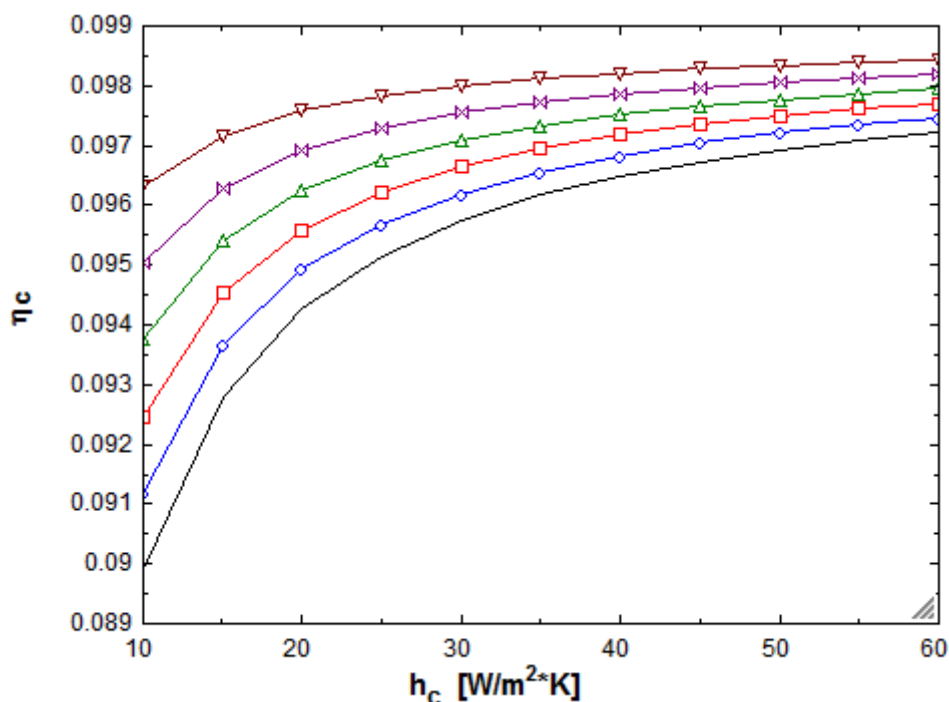


Figura 8. Eficiência da célula X coeficiente de convecção para diferentes concentrações. De baixo para cima, tem-se 10X, 15X,...,35X.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, a lente Fresnel projetada permitiria células fotovoltaicas instaladas com um dissipador térmico passivo operar a 60°C e com eficiência na ordem de 9,6%, 0,4% abaixo da sua eficiência nas condições padrão de teste. Paralelo a isso, obteve-se uma relação para se obter a eficiência da célula em função da taxa de concentração e do coeficiente de convecção do dissipador térmico.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - "National Counsel of Technological and Scientific Development" - CNPq pelo suporte financeiro ao projeto (Processo 406861/2013-7).

6. REFERÊNCIAS

- Carlson, D. E., Lin, G., Ganguly, G., 2000. Temperature dependence of amorphous silicon solar cell PV parameters, BP Solar, p. 707-712.
- Çengel, Y. A., 2003. Heat Transfer: A Practical Approach, 2. ed., McGraw-Hill.
- Maghanga, C. M., Mwamburi, M. M., 2012. Contribution of spectrally selective reflector surface to heat reduction in silicon concentrator solar cells, Solar Power, InTech.
- Pathak, M.J.M.; Pearce, J.M.; Harrison, S.J., 2012. Effects on amorphous silicon photovoltaic performance from high-temperature annealing pulses in photovoltaic thermal hybrid devices. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 100, p.199-203.
- Ramos-Alvarado, Bladimir; et al., 2011. CFD study of cooled heat sinks with microchannel flow field configurations for electronics, fuel cells, and concentrated solar cells, Applied Thermal Engineering, vol. 31, p. 2494-2507.
- Santos, M. B. C., 2015. Análise ótica de uma lente de Fresnel, São Cristóvão, 2014-2015, 18 p.
- Skoplaki, E., Palyvos, J.A., 2008. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, Solar Energy, vol. 83, p. 614-624.
- Viana, T. S., 2010. Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil, 115p, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”

TECHNICAL VIABILITY OF THE USE OF CONCENTRATORS ON HOMOJUNCTION PHOTOVOLTAIC CELLS

Arthur Vinícius Alves Rabêlo, joaovictoraj@hotmail.com ¹
Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com ¹

¹ Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, s/n, São Cristóvão-SE

Abstract: *In the last decades there has been an increasing encouragement to electricity generation from renewable resources. One of the ways to produce electricity from solar energy is by using photovoltaic cells. This work consists in analyzing, by calculation and software analyses, their thermal behavior under low concentration, turning attention to the temperature they can achieve and its influence on their efficiencies, as well as the solutions to overcome the problems encountered. The concentration of solar rays, in this case, will be done by using Fresnel lens, giving a certain direction to the line of work. Given the variables approached, it was possible to observe, for instance, that the temperature of a photovoltaic cell could rise up to 200°C, depending on the environmental conditions, and that attaching it to a passive cooling system using heat sinks can make its temperature drop down to 60°C. At this condition, homojunction solar cells without electric contacts on the frontal face or with a thin layer could be used for low concentration.*

Keywords: *Photovoltaic Concentrator, Heat Sink, Efficiency*