

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE ENERGIA SOLAR E DA EFICIÊNCIA ÓTICA DE UM
CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL COM ABSORVEDOR PLANO****Fantini D.G.*, Baptista de Siqueira M.B.***

* Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Lab. de Energia e Ambiente, Campus Darcy Ribeiro Asa Norte, Brasília, DF, CEP 70910-900, Brasil. fantindario@gmail.com, mariosiqueira@unb.br, <http://www.lea.unb.br>

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2044>

RESUMO

Apresenta-se uma análise da uniformidade da densidade do fluxo de energia solar concentrada e da eficiência de um concentrador solar do tipo refletor linear Fresnel, existente no Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Esta análise é realizada através da simulação com o software TONATIUH conjuntamente com o software OCTAVE. Apresentam-se os valores da média mensal por hora da eficiência ótica e do índice de uniformidade do fluxo de energia solar concentrada na superfície do absorvedor. Em formato de mapa de cores mostra-se a distribuição da irradiância na superfície do absorvedor para diferentes horários e meses do ano. O concentrador apresenta boa uniformidade na distribuição do fluxo no período das 10h até as 14h para todos os meses do ano e uma eficiência ótica máxima de 0,79. Verifica-se que as perdas de final de linha na iluminação do absorvedor diminuem significativamente a eficiência elétrica do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Uniformidade, Eficiência Ótica, CPVT, Linear Fresnel, Tonatiuh Ray Tracing.

ABSTRACT

An analysis of the uniformity of the concentrated solar energy flux density and the efficiency of a Fresnel linear reflector solar concentrator is presented. This concentrator is located at the Energy and Environment Laboratory of the Faculty of Technology of the University of Brasilia. The analysis was carried out through simulation with the software TONATIUH and OCTAVE. The average monthly values per hour of the optical efficiency and uniformity index of the concentrated solar energy flux on the absorber surface are presented. In color map format, the distribution of irradiance on the absorber surface is shown for different times and months of the year. The concentrator shows good uniformity in the flux distribution from 10 am to 2 pm for all months of the year and a maximum optical efficiency of 0.79. It is verified that the end losses of illumination on the absorber reduce significantly the electrical efficiency of the system.

KEYWORDS: Uniformity, Optical Efficiency, CPVT, Linear Fresnel, Tonatiuh Ray Tracing

INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como ênfase a análise da eficiência ótica e da uniformidade da distribuição do fluxo de energia na superfície do absorvedor gerada pelo concentrador do tipo refletor linear Fresnel (LFR) existente no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Pretende-se determinar a viabilidade de sua integração como parte de um protótipo de sistema concentrador solar fotovoltaico térmico (CPVT). Este sistema se baseia no uso de células fotovoltaicas convencionais de silício mono cristalino e no uso de um absorvedor de calor conjuntamente com o concentrador solar. O concentrador solar aumenta a densidade do fluxo luminoso na superfície das células fotovoltaicas, que são instaladas sobre a superfície do absorvedor plano (duto de seção transversal retangular), pelo qual escoam um fluido refrigerante (água) que evita o aumento de temperatura de forma excessiva nas células. O calor absorvido pelo fluido pode ser reaproveitado para qualquer processo de aquecimento de baixa temperatura, como por exemplo aquecimento de espaços residências ou de trabalho.

Além do problema de manter a temperatura das células em níveis adequados para evitar uma perda expressiva da eficiência, apresentam-se também os problemas atrelados à não uniformidade da irradiância concentrada nas células. Conforme apresentado por Franklin e Coventry (2002) e Hu et al. (2013) células fotovoltaicas expostas a focos de iluminação não uniforme, produzidos por diversos sistemas de concentração solar, experimentam diminuição da eficiência como consequência da redução da tensão de circuito aberto, devido às diferenças de temperaturas que se estabelecem entre as regiões menos iluminadas e as mais iluminadas. O estudo de Martinez Lopez (2016) conclui que uma radiação não uniforme levará a uma distribuição não uniforme da temperatura na célula solar, o que causará uma modificação no seu desempenho. Zhang et al. (2019) expõem que valores elevados de não uniformidade na iluminação das células implica em elevadas perdas ôhmicas. Amanlou et al. (2016) relatam que diversos modelos óticos para concentradores solares focais ou lineares são propostos por diferentes pesquisadores, entretanto não existe suficiente informação sobre a uniformidade da concentração do fluxo de energia nos coletores ou absorvedores planos retangulares.

De acordo com Baig et al. (2012) os efeitos da não uniformidade na iluminação das células em concentradores solares podem ser analisados aplicando métodos teóricos e elementos finitos em uma, duas ou três dimensões (1-D, 2-D e 3-D), exemplos destes são os trabalhos apresentados por Mitchell (1977), Luque et al. (1998), Franklin e Coventry (2002), Galiana et al. (2005), Mellor et al. (2009), Proell et al. (2016) e Zhang et al. (2019) existem também trabalhos de revisão sobre o assunto (Baig et al. 2012; Amanlou et al. 2016 e Li et al. 2018), Baig et al. 2012 destacam que a não uniformidade pode aumentar o preço da energia produzida com CPV, tornando-a não lucrativa a longo prazo e, portanto, é importante compreender seu impacto caso a caso e incluir seu efeito nos cálculos de longo prazo da tecnologia. Ao mesmo tempo, métodos para medir esse efeito com precisão e reduzir seu impacto precisam ser explorados para o benefício da indústria de CPV. Consequentemente isto deve ser levado em conta para sistemas CPVT.

Diante dos problemas expostos relacionados à não uniformidade do fluxo luminoso objetiva-se o estudo e análise da não uniformidade e da eficiência ótica do concentrador a ser utilizado. A partir deste estudo pretende-se identificar medidas que minimizem a perda de eficiência elétrica das células fotovoltaicas. Para isso escolheu-se a modelagem e simulação do sistema concentrador refletor linear Fresnel, utilizando-se o software de traçado de raios (ray tracing) TONATIUH, que permite obter os dados da distribuição do fluxo da concentração solar sobre o absorvedor em formato de arquivos ASCII. Posteriormente, estes arquivos são processados com o software OCTAVE, obtendo-se os valores da média mensal por hora da eficiência ótica e do índice de uniformidade da distribuição do fluxo de energia concentrada na superfície do absorvedor. Apresentam-se os resultados da variação da média da eficiência ótica e do índice de uniformidade do fluxo, para cada mês do ano por hora, também se mostra a distribuição do fluxo na superfície do absorvedor por meio de mapas de cores.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O concentrador solar LFR é apresentado na Fig. 1 e Fig. 2 e faz parte de um sistema CPVT, que se localiza na latitude $-15,78$ e longitude $-47,93$, coordenadas do LEA utilizadas nas simulações. O concentrador está constituído por 15 espelhos (características apresentadas na Tabela 5) que são orientados longitudinalmente sentido norte-sul. A distância focal entre espelhos e absorvedor é 1,5 m. Os espelhos possuem seguimento solar de um eixo e concentram o fluxo de energia solar na superfície do absorvedor. Os eixos de rotação se encontram localizados em sentido longitudinal Norte-Sul coincidindo com o eixo Z do TONATIUH; o eixo Y deste corresponde à altura e o X ao sentido Oeste-Leste. Cada espelho possui um ângulo de inclinação próprio em relação ao plano horizontal, função da posição do Sol. A superfície do absorvedor tem uma largura e comprimento de 0,125m e 1,5m respectivamente. O absorvedor se encontra montado numa estrutura que possibilita sua movimentação no sentido norte-sul ficando fixa à base dos espelhos como se visualiza na Fig. 1 e Fig. 2. O deslocamento (d) máximo foi limitado em 3m, o suficiente para iluminar a superfície do absorvedor nas horas de Sol na região de Brasília durante os diferentes meses do ano. Este deslocamento varia com a posição do Sol, como se pode ver na Fig. 2, diminuindo expressivamente as perdas por final de linha (end losses).



Fig. 1. Concentrador refletor linear Fresnel pertencente ao LEA
Fonte: Gadioli de Sousa (2018)

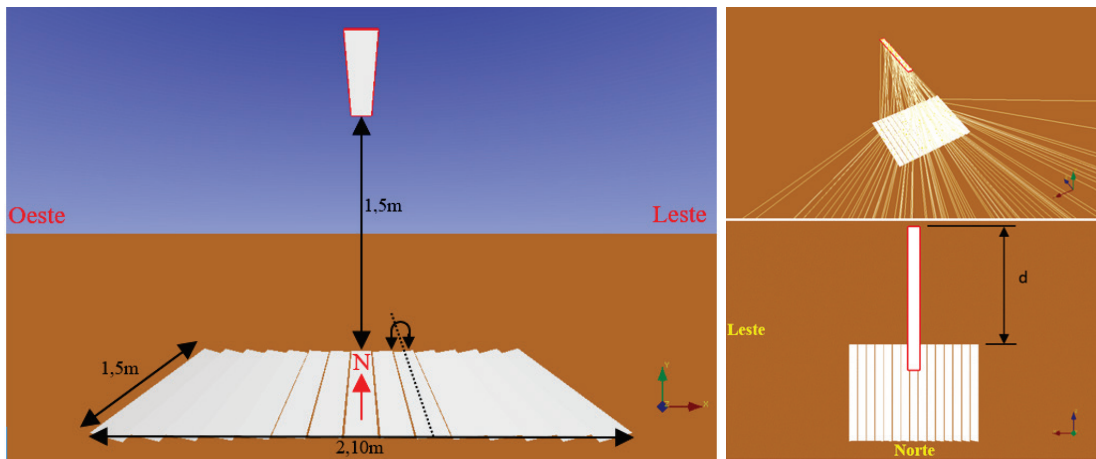


Fig. 2. Concentrador modelado no TONATIUH - Deslocamento longitudinal do absorvedor

Tabela 1. Características dos espelhos

Quant. Espelhos	Largura	Comprimento	Espaçamento	Refletividade	Espessura
15	0,125 m	1,5 m	9 mm	0,92	3 mm

ESPECIFICAÇÕES DA MODELAGEM

Foi escolhido o software livre de código aberto TONATIUH (versão 2.2.4) para executar a modelagem e simulação, desenvolvido pelo CENER (Centro Nacional de Energias Renováveis, Espanha), este possibilita a modelagem geométrica tridimensional do concentrador e o traçado de raios ou fótons que permitem conhecer a distribuição da iluminação na superfície do absorvedor. Possui um editor de script (baseado na ECMAScript Language Specification) que possibilita a automação da simulação. É importante sinalizar que a simulação do traçado dos raios solares realizada pelo software se baseia no método de Monte Carlo, portanto a precisão dos dados obtidos dependerá da quantidade de raios utilizados na configuração.

Inicialmente foram criados os diferentes elementos ou nodos (espelhos e absorvedor) do sistema no TONATIUH com suas geometrias e características correspondentes conforme descrito, subsequentemente foi automatizada a simulação variando a posição do Sol conforme hora e dia do ano. As configurações adotadas para a simulação foram as seguintes,

- modelo de transmissividade atmosférica: Transmissivity Type = "Ballestrin Transmissivity";
- modelo da forma solar: Sunshape Type = "Pillbox_Sunshape"; Sunshape Type → Parameter irradiance = 1000 [W/m²]; Sunshape Type → Parameter thetaMax = 0,00465 [rad],
- quantidade de raios para a simulação: Number of Rays = 30000000;
- refletividade dos espelhos: Specular_Standard_Material → m_reflectivity = 0,92;
- error Specular_Standard_Material → m_sigmaSlope = 2 [mrad],

O código de automatização varia em 5° o ângulo de elevação e azimute do Sol, totalizando 1368 posições. Para cada posição é gerado um arquivo ASCII. Cada arquivo contém as informações do fluxo solar [W/m²] nas diferentes subáreas da superfície do absorvedor. É importante destacar que a superfície total do absorvedor é dividida em uma malha (Grid divisions) definida pelo usuário, para fazer a análise inicial definiu-se 20x20 como se pode ver na Fig. 3, conseqüentemente cada arquivo contém 400 coordenadas x e y [m] e, portanto, a área total do absorvedor possui 400 subáreas, cada coordenada sinaliza o ponto meio de uma subárea e cada subárea é identificada pelos sub índices i, j.

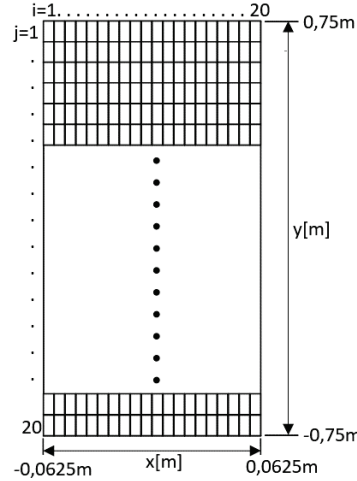


Fig. 3. Malha de divisão da área do absorvedor em subáreas

Com os dados do fluxo de irradiância em cada subárea do absorvedor foram calculados, através de uma rotina desenvolvida em OCTAVE, os valores do índice de uniformidade no receptor e a eficiência ótica do sistema refletor linear Fresnel. Utilizaram-se as Eqs. (1), (2), (3) e (4) a para o cálculo conforme descritas por Cardoso et al. (2018) com modificações,

$$\text{uniformidade (índice)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^{I=20} \sum_{j=1}^{J=20} (\Phi_{i,j} - \bar{\Phi})^2}}{\bar{\Phi}} \quad (1)$$

$$\Phi_{i,j} = \frac{N_{i,j} P_{ph}}{A_s} \quad (2)$$

$$A_s = |x_i - x_{i+1}| * |y_i - y_{i+1}| \quad (3)$$

$$\bar{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^{I=20} \sum_{j=1}^{J=20} \Phi_{i,j}}{IJ} \quad (4)$$

onde $\Phi_{i,j}$ [W/m²] é a densidade do fluxo incidente na subárea i, j; $N_{i,j}$ é o número de fótons ou raios que incidem nessa subárea; P_{ph} [W] é a potência por fóton; A_s [m²] é o tamanho da subárea; x_i [m] e y_i [m] são as coordenadas do ponto central da primeira subárea; x_{i+1} e y_{i+1} são coordenadas do ponto central das subáreas vizinhas e $\bar{\Phi}$ [W/m²] é a média da densidade do fluxo incidente na superfície do absorvedor. A uniformidade é definida como um índice adimensional que permite mensurar a homogeneidade da distribuição da densidade do fluxo de irradiância solar em uma superfície dada, e se define como o desvio padrão do fluxo normalizado com o valor médio do fluxo incidente na superfície.

Para o cálculo do rendimento ou eficiência ótica do concentrador (η_{conc}) aplica-se a Eq. (5),

$$\eta_{conc} = \frac{\dot{Q}}{DNI A_{conc}} \quad (5)$$

$$\dot{Q} = P_{ph} \sum_{i=1}^{I=20} \sum_{j=1}^{J=20} N_{i,j} \quad (6)$$

onde \dot{Q} [W] é a potência total incidente na superfície de interesse, DNI é a irradiância normal direta incidente e A_{conc} [m²] se refere à área de abertura total do concentrador considerando o ângulo de elevação do Sol igual a 90°. Neste trabalho foi utilizado um DNI de 1000 W/m² para todos os cálculos. O valor de A_{conc} é de 2,76787m², considera-se só a projeção dos espelhos no plano horizontal.

O absorvedor é deslocado em função da posição do Sol e para isso foi criado um script no TONATIUH para tratar a descontinuidade do ângulo de azimute 0°-360° gerada; e também calcular a variação média longitudinal na incidência dos raios no plano do absorvedor refletidos por cada espelho, permitindo uma distribuição do fluxo mais uniforme no sentido longitudinal do absorvedor.

RESULTADOS E ANÁLISE

Na Fig. 4 são apresentados os valores médios por hora para cada mês do ano onde as linhas tracejadas representam os valores dos índices de uniformidade e as linhas cheias os valores da eficiência ótica. Vale ressaltar que quanto mais próximo de zero for o valor do índice de uniformidade mais uniforme será a distribuição do fluxo luminoso na superfície do absorvedor. Para os meses de janeiro até março e de outubro até dezembro no horário entre 9h e 15h o sistema trabalha com um índice de uniformidade menor a 0,3 e uma eficiência ótica superior a 0,72. Para os meses de abril até setembro encontram-se valores do índice de uniformidade inferiores a 0,3 no horário de 10h a 14h e uma eficiência superior a 0,61. Estes gráficos mostram a simetria no funcionamento do sistema em diferentes meses do ano.

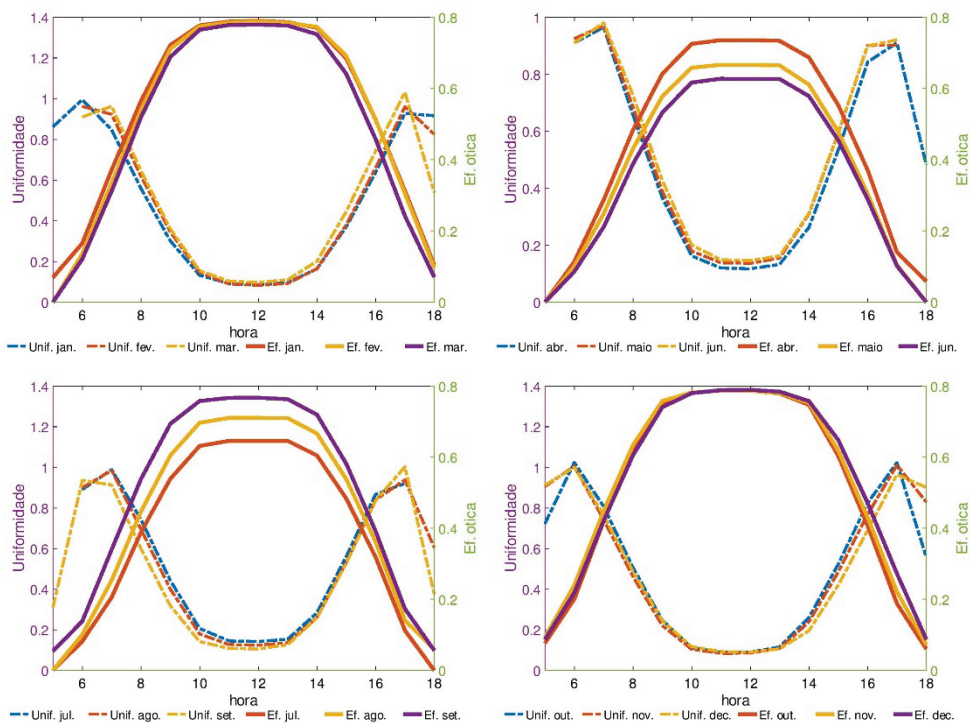


Fig. 4. Valores médios para cada mês do ano por hora do índice de uniformidade e da eficiência ótica

No que diz respeito do comportamento da uniformidade nos extremos dos gráficos da Fig. 4, temos uma diminuição do índice, indicando um aumento na homogeneidade da distribuição do fluxo no absorvedor. Isto se deve ao bloqueio causado pelos espelhos dos extremos do concentrador sobre os restantes, nos horários próximos do nascer e pôr do Sol.

Na

Fig. 5 são apresentados os resultados de uma simulação no horário próximo ao pôr do Sol, os quais permitem visualizar o efeito do bloqueio dos espelhos gerando a perda acentuada da eficiência ótica, mas também visualiza-se a melhoria indicada em relação à uniformidade na distribuição do fluxo no caso dos horários de nascer e pôr do Sol. Os resultados correspondem ao dia 15 de setembro às 18h, o índice de uniformidade para esse dia e horário é 0,63;

em vermelho indica-se a elevada uniformidade do fluxo no meio do absorvedor com um valor de aproximadamente 750 W/m². A lateral do lado Leste terá maior irradiância nos horários próximos ao pôr do Sol, este comportamento se reproduz na lateral oposta nos horários próximos ao nascer do Sol.

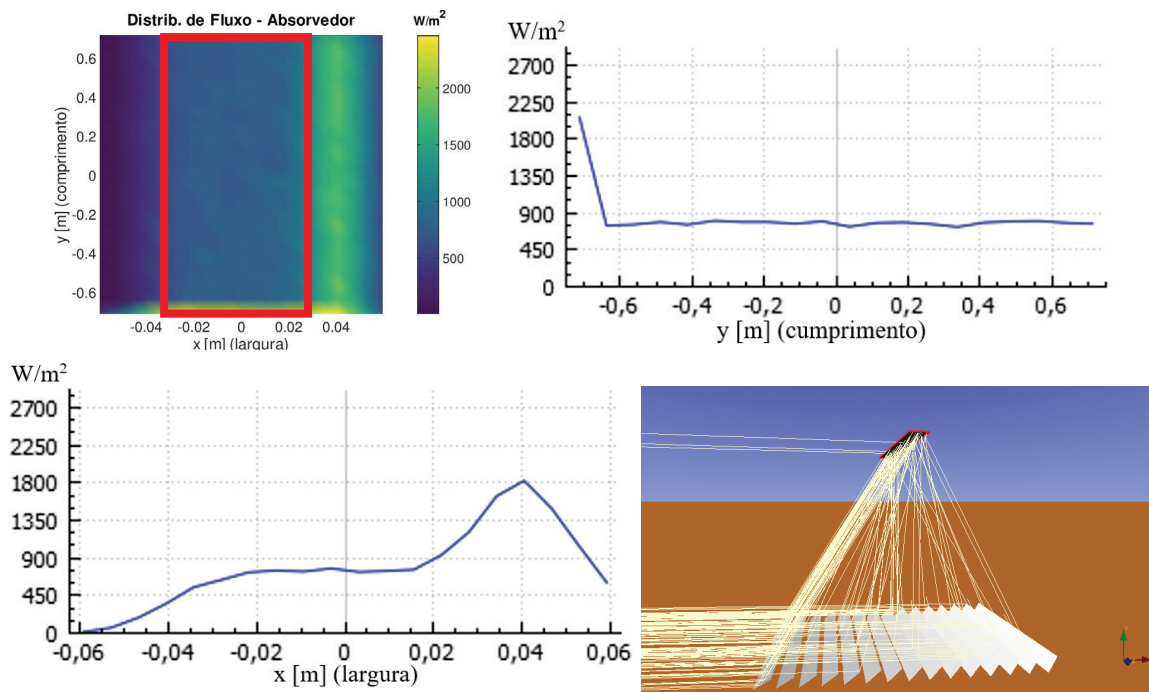


Fig. 5. Distribuição do fluxo e simulação dos raios no dia 15 de setembro às 18h

Na Fig. 6 mostra-se a distribuição do fluxo na superfície do absorvedor para os meses de janeiro, junho e setembro, para representar a média de cada mês optou-se pelo dia 15 para os meses com 30 dias e o dia 16 para os dias com 31. Os gráficos de uma mesma fileira pertencem a um mesmo mês e cada coluna representa uma hora, começando da esquerda para direita temos 8h, 10h, 12h e 14h local. Os gráficos das horas seguintes não são colocados por apresentarem simetria com as anteriores. Com relação a estes gráficos deve-se ressaltar sua importância como forma de evidenciar visualmente a distribuição do fluxo, permitindo detectar e antecipar problemas, que de modo experimental poderiam demandar muito tempo ou não serem percebidos de forma direta. Outro fator importante da visualização é que permite estabelecer uma coerência do índice de uniformidade, já que pode existir um mesmo índice para diferentes distribuições do fluxo na superfície do absorvedor. Pode ser observado nos gráficos que em alguns meses, como por exemplo janeiro e setembro, o absorvedor apresenta uma iluminação maior em um de seus extremos no horário de 10h até 14h, onde o índice de uniformidade indica uma distribuição mais homogênea do fluxo, mas não indica essa diferença na iluminação. A iluminação mais acentuada em um dos extremos do absorvedor (no eixo y) se deve ao sombreamento parcial dos espelhos centrais causado pelo mesmo absorvedor. Este efeito diminui para os meses que o ângulo zenital é maior entre as 10h e 14h. Os gráficos correspondentes ao horário de 8h evidentemente ocasionariam um decaimento acentuado no que se refere à geração de energia fotovoltaica sendo que existe iluminação só na metade da superfície e, portanto, na metade de cada célula considerando que serão instaladas longitudinalmente na superfície do absorvedor. Este comportamento começa a se repetir aproximadamente depois das 15h dependendo do dia do ano.

Os resultados das simulações apresentados na Fig. 6 permitem visualizar as perdas de final de linha que ocorrem nos extremos longitudinais do absorvedor (eixo y), a partir da análise das simulações foi possível determinar que estas perdas acontecem por três causas diferentes: i) por sombreamento longitudinal parcial dos espelhos gerado pelo absorvedor quando o ângulo zenital é maior que 0° e menor que um valor que dependera da altura focal, para o caso de estudo este ângulo foi de 36° considerando o deslocamento do absorvedor; ii) pelo ângulo de elevação do Sol diferente de 90°, o efeito desta causa foi atenuado significativamente introduzindo o deslocamento do absorvedor; e iii) por causa da distância focal relativa de cada espelho, o efeito desta diminui com o aumento da altura focal do sistema e aumenta com a diminuição do ângulo de elevação do sol, este efeito pode ser visualizado na Fig. 8.

Na superfície do absorvedor são instaladas 48 células no sentido longitudinal com a mesma largura que este (125mm) e comprimento de 31,25mm, conectadas em série, cada célula é dividida em 8 elementos de acordo com a Fig. 7 e Fig. 8 onde é introduzida uma malha de 48x8. Aplicando-se o modelo elétrico unidimensional apresentado por Zhang et al. (2019) verifica-se para o caso da Fig. 7 que a corrente gerada em cada célula fotovoltaica são similares devido à uniformidade na iluminação, contudo a primeira célula limitará a corrente das outras porque se encontrar exposta a

menor irradiância e temperatura (por estar do lado da entrada do fluido). O valor da corrente obtido foi de 8,055A e uma tensão 21,35V para o arranjo de 48 células totalizam uma potência elétrica de 172 W. Esta potência representa uma eficiência elétrica do receptor de 10,39%.

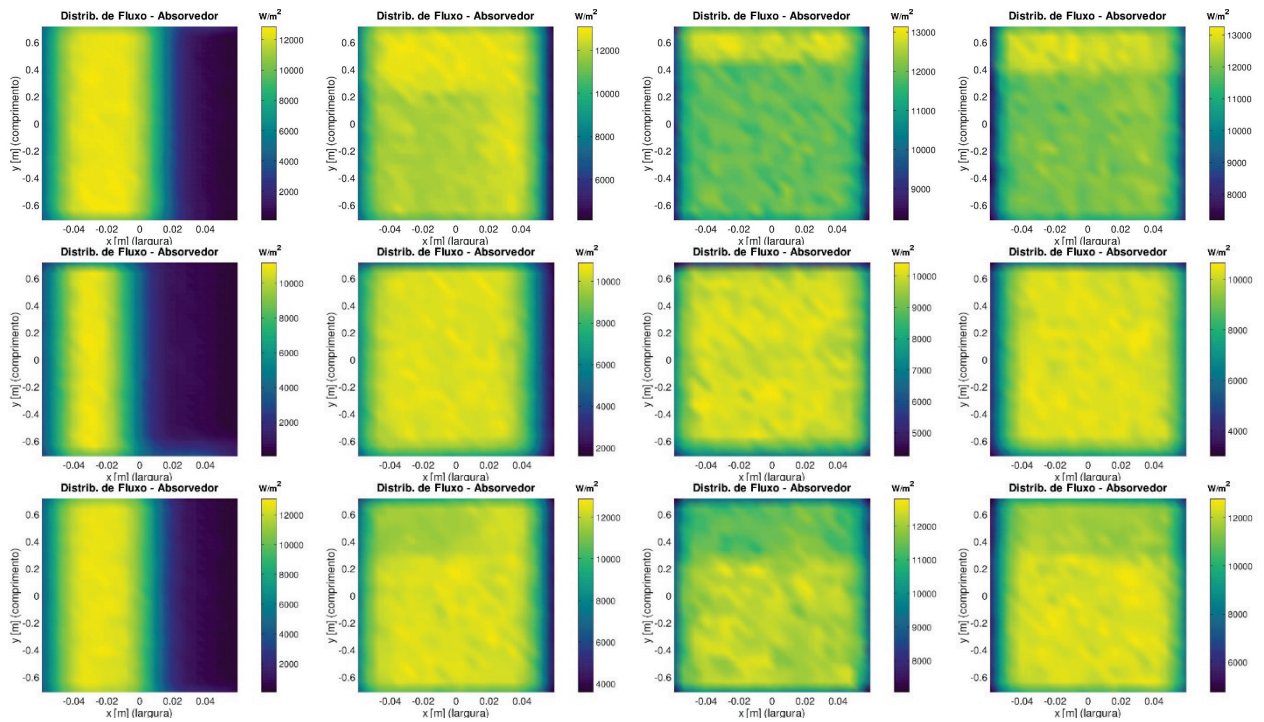


Fig. 6. Distribuição da densidade do fluxo solar na superfície do absorvedor por mês e hora

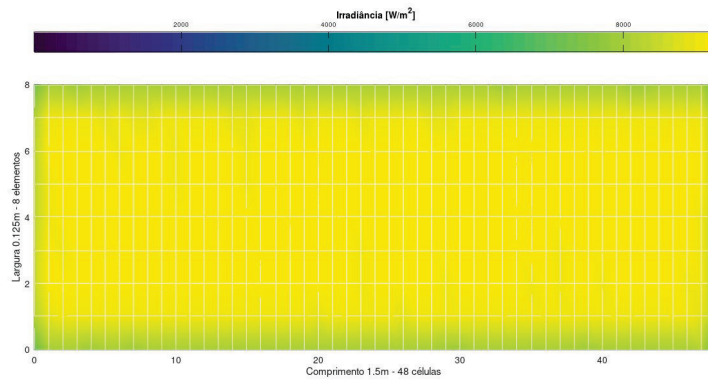


Fig. 7. Distribuição do fluxo de energia sobre o absorvedor – DNI = 800W/m², Azimute = 0° e Elevação = 90°

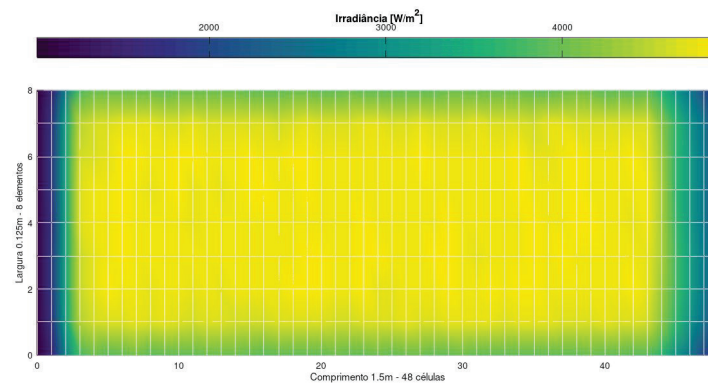


Fig. 8. Distribuição do fluxo de energia no absorvedor – DNI = 800W/m², Azimute = 0° e Elevação = 50,78°

Para o caso da Fig. 8 a corrente que limita a potência elétrica também é da primeira célula com um valor de 1,44A e uma tensão fotovoltaica de 22,92V e, portanto, uma potência elétrica de 33W que representa uma eficiência elétrica de 3,11% para o absorvedor. Os efeitos deste problema podem ser minimizados mediante a implementação de diodos de desvio (by-pass).

COMENTÁRIOS FINAIS

Conforme o objetivo proposto de analisar a uniformidade do fluxo no absorvedor e a eficiência ótica do sistema linear Fresnel, para determinar a viabilidade de integração em um sistema protótipo híbrido fotovoltaico térmico, e com base na discussão apresentada, conclui-se que o mesmo pode se utilizar inicialmente para executar os testes experimentais, porém deverão ser realizadas algumas melhoras no desenho que permitam diminuir a perda na densidade do fluxo luminoso tanto nas laterais quanto nos extremos do absorvedor objetivando um protótipo que permita seu uso em um ambiente real.

O concentrador apresenta uma elevada uniformidade na distribuição do fluxo no período entre as 10h e 14h para todos os meses do ano, período no qual a eficiência ótica se mantém próxima do valor máximo possível de 0,79 segundo o dia e mês.

O problema da perda de iluminação dos extremos ou perdas de final de linha são as que mais afetam o sistema no que se refere à potência elétrica, por causa das células nessa região gerarem correntes baixas em relação as que são geradas nas células que se encontram mais iluminadas, limitando a corrente estar conectadas em série.

Percebe-se que a apresentação dos resultados da análise da uniformidade da irradiância no formato de mapas de cores fornece informação relevante que não pode ser determinada pelo índice de uniformidade, ressaltando a importância da visualização da informação para este tipo de análise.

REFERÊNCIAS

- Amanlou, Y., Tavakoli, T., Ghobadian, B., Naja, G. and Mamat, R. (2016). A comprehensive review of Uniform Solar Illumination at Low Concentration Photovoltaic (LCPV) Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 1430–1441.
- Baig, H., Heasman, K. C. and Mallick, T. K. (2012). Non-uniform illumination in concentrating solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 5890-5909.
- Cardoso, J. P., Mutuberria, A., Marakkos, C. and Schoettl, P. (2018). New Functionalities for the Tonatiuh Ray-tracing Software, *AIP Conference Proceedings*, 2033, pp. 210010-1 - 210010-9.
- Franklin E. T. and Coventry J. S. (2002). Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance of solar cells, *In 40th Annual Conference for the Australian New Zealand Solar Energy Society, ANU Research Publications*.
- Gadioli de Sousa J. P. (2018). Análise da Transferência de Calor em Concentrador Solar do Tipo Fresnel Linear de Tubo Evacuado: Estudo da Pressão, *Projeto de graduação, Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Brasília*.
- Galiana, B., Algora, C., Rey-Stolle, I. and García Vara, I. (2005). A 3-D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 52, pp. 2552-2558.
- Hu, P., Zhang, Q., Liu, Y., Sheng, C., Cheng, X. and Chen, Z. (2013). Optical analysis of a hybrid solar concentrating Photovoltaic/Thermal (CPV/T) system with beam splitting technique. *Science China Technological Sciences*, 56, pp. 1387-1394.
- Li, G., Xuan, Q., Pei, G., Su, Y. and Ji, J. (2018). Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell - A review, *Energy*, 144, pp. 1119-1136.
- Luque, A., Sala, G. and Arboiro, J. C. (1998). Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 51, pp. 269-290.
- Martinez Lopez J. N., (2016). The influence of irradiance concentration using an asymmetric reflector on the electrical performance of a PVT hybrid collector with standard monocrystalline cells, *Thesis of the Master of Science Degree in Energy Engineering and Management, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa*.

Mellor, A., Chemisana, D. and Rosell, J. I. (2009). A two-dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination, *Solar Energy*, 83, pp. 1459–1465.

Mitchell, K. W. (1977). Computer analysis of resistance and non-uniform illumination effects on concentrator solar cells, *International Electron Devices Meeting*, pp. 229-232.

Proell, M., Karrer, H., Brabec, C.J. and Hauer, A. (2016). The influence of CPC reflectors on the electrical incidence angle modifier of c-Si cells in a PVT hybrid collector, *Solar Energy*, 126, pp. 220-230.

Zhang, G., Wei, J., Wang, Z., Xie, H., Xi, Y. and Khalid, M. (2019). Investigation into effects of non-uniform irradiance and photovoltaic temperature on performances of photovoltaic/thermal systems coupled with truncated compound parabolic concentrators, *Applied Energy*, 250, pp. 245-256.