

ANÁLISE DO SOMBREAMENTO ENTRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Daniel Vitorino de Souza – daniel_vsouza@hotmail.com

Gabriel Ivan Medina Tapia – gmedinat@ct.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas – LSTEA

Resumo. Na busca por meios de se aumentar a produção energética mundial através do uso de fontes renováveis, percebe-se o destaque do uso de sistemas fotovoltaicos, que podem ser implementados em pequenas ou grandes áreas, a depender da necessidade de produção e disponibilidade de espaço físico. Além de que o sistema fotovoltaico converte a energia solar diretamente para energia elétrica, implicando em apenas uma perda por conversão. Por sua vez, sombreamento é um problema a ser evitado, já que além de diminuir o rendimento do sistema, também pode danificar as células solares. O presente trabalho sugere estudar este problema através da análise do comprimento da sombra entre dois módulos fotovoltaicos, baseando-se em equações de rastreamento solar e trigonometria simples implementadas ao software matemático MATLAB. Visando-se validar o modelo proposto, dados usados por Castellano et al. (2015) foram implementados no código criado e os resultados comparados. Evidenciou-se um erro relativo máximo de 1.19%, considerado suficiente para validação do método, e um comprimento máximo da sombra foi obtido no nascer e no pôr do sol, quando tem-se menores valores para a altura solar, e aumentou proporcionalmente à inclinação do painel.

Palavras-chave: Sombreamento, Painéis Fotovoltaicos, Energia Solar

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o International Energy Outlook 2017 (Energy Information Administration, 2017) há uma projeção para o crescimento de 28% no consumo de energia no mundo entre os anos de 2015 e 2040, podendo tal crescimento estar relacionado ao crescimento da população mundial. Segundo projeções realizadas pela Organização das Nações Unidas (2017), a população mundial deverá sofrer um crescimento de aproximadamente 7.6 bilhões em meados de 2017, para 9.8 bilhões em 2050, tal relação e suas consequências foram analisadas por Jones e Warner (2016).

Por sua vez, a matriz de energia elétrica brasileira tem nas usinas hidroelétricas sua principal fonte, com 1269 usinas em operação gerando 61.4% de toda a energia elétrica do país, seguida pelos combustíveis fósseis, com aproximadamente 16.6% (ANEEL, 2017) (ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica). Apesar de ser considerada uma fonte de energia renovável, pois usa-se o movimento da água para geração de eletricidade, existem grandes impactos socioambientais envolvidos na instalação de uma usina hidroelétrica, pois quando se constrói a barragem de contenção da água, há a inundação de uma grande área de terra ao seu redor, obrigando moradores e animais a migrarem para outras regiões, desequilibrando assim a economia e o ecossistema local, além de que o processo de decomposição da matéria orgânica que foi inundada libera gases poluentes, como o dióxido de carbono e metano.

Na busca por formas alternativas de gerar energia elétrica que causem menos impactos e gerem menos custo, evidencia-se uma evolução no estudo das energias limpas, provenientes principalmente do vento, sol e ondas marítimas. Pelo fato de o Brasil possuir uma boa média anual de incidência solar, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017), o campo da energia solar tem sido bastante explorado por pesquisadores.

Dentre as formas mais comuns de se obter energia através da irradiação solar estão os módulos fotovoltaicos, onde usa-se tanto a componente direta quanto a difusa da radiação solar no seu processo, que através do efeito fotovoltaico convertem a energia fornecida pelo sol em energia elétrica.

Outra forma que vem se difundindo no ramo da energia solar, desta vez para geração em grande escala, são as CSP's (Concentrating Solar Power) onde os raios solares são coletados e concentrados num foco, podendo ser usado para movimentar um motor térmico tipo Stirling, ou aquecendo alguma substância e utilizá-la num ciclo termodinâmico como Rankine ou Brayton para geração de eletricidade.

No uso da tecnologia de painéis fotovoltaicos para geração de pequeno e médio porte não se faz necessário a disponibilidade de uma grande área para a instalação dos mesmos, observando-se o uso principalmente em telhados, onde o painel terá a mesma inclinação da superfície em que se encontra, ou apoiados em colunas fixas, onde pode-se controlar a inclinação dos painéis, podendo ambos ser instalados em meios residenciais e industriais, maiores consumidores de energia elétrica do país no ano de 2015, totalizando 55.6% do consumo nacional (Ministério de Minas e Energia, 2016).

2. JUSTIFICATIVA

Módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas ligadas em série, onde a produção de potência do sistema depende principalmente de três parâmetros, sendo eles a irradiação solar, temperatura da célula e a carga de impedância (Kandemir *et al.*, 2017).

Quando expostos a condições uniformes, a curva Potência x Tensão do módulo fotovoltaico apresentará somente um ponto de máximo. Porém, quando o módulo estiver parcialmente sombreado, sua curva P-V apresentará mais de um ponto de máximo, recebendo assim uma menor quantidade de irradiação solar, de modo que haverá uma queda na voltagem destas células, fazendo que se tornem carga para o circuito, ou seja, irão consumir potência ao invés de gerar (Ishaque e Salam, 2013), diminuindo assim o rendimento do sistema, podendo vir até a danificar as células fotovoltaicas devido ao aumento da corrente elétrica passando pela mesma, aumentando assim sua temperatura, problema conhecido como *hotspot*. Um melhor entendimento pode ser feito a partir da análise da Fig. 1, onde são plotadas as curvas P-V de dois sistemas fotovoltaicos, um sem sombreado algum e outro submetido a um sombreado parcial, onde este apresenta um ponto de máximo global inferior ao do caso uniforme e dois pontos de máximo locais.

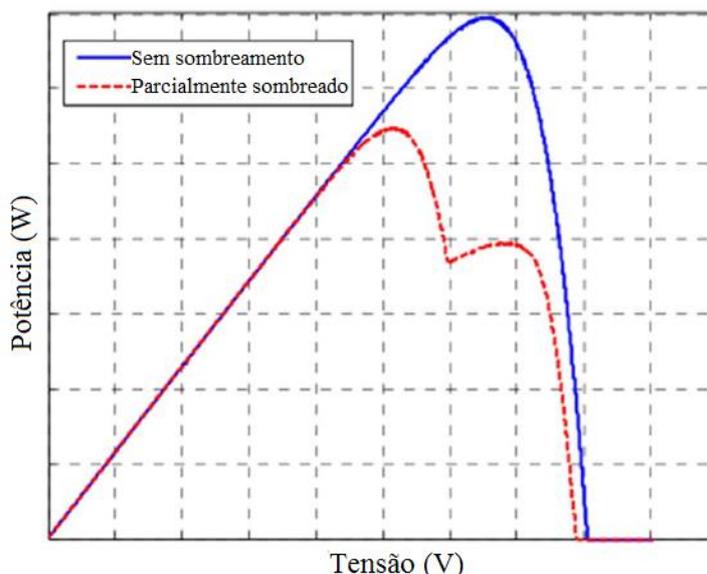


Figura 1 – Curvas P – V de um sistema fotovoltaico (adaptado de Kandemir *et al.*, 2017).

3. METODOLOGIA

Foi usado o *software* MATLAB para desenvolvimento do código matemático que calcula numericamente o comprimento da sombra dos painéis fotovoltaicos baseado em equações de rastreamento solar disponíveis na literatura, e assim definir o comportamento da sombra durante o período solar. Determinando assim a distância necessária entre as fileiras de painéis para que não haja efeito de sombreado.

3.1 Rastreamento solar

Para determinação da posição do sol durante o dia, foi primeiramente determinado o ângulo de declinação da Terra (δ), definida como o ângulo entre a linha que une o centro da terra e o sol com o plano equatorial, e o ângulo horário (ω), medido como o ângulo entre o meridiano do observador e o meridiano que contém o sol, ambos ilustrados na Fig. 2.

A declinação pode ser calculada de forma mais precisa por meio da Eq. (1), onde o valor final está representado em radianos. Por sua vez, a Eq. (2) representa o ângulo do dia em radianos, já o ângulo horário é determinado como 0° no meio dia solar e aumenta 15° a cada hora.

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos(\Gamma) + 0.070257\sin(\Gamma) - 0.006758\cos(2\Gamma) + 0.000907\sin(2\Gamma) - 0.002697\cos(3\Gamma) + 0.00148\sin(3\Gamma) \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (2)$$

Sendo n o dia juliano.

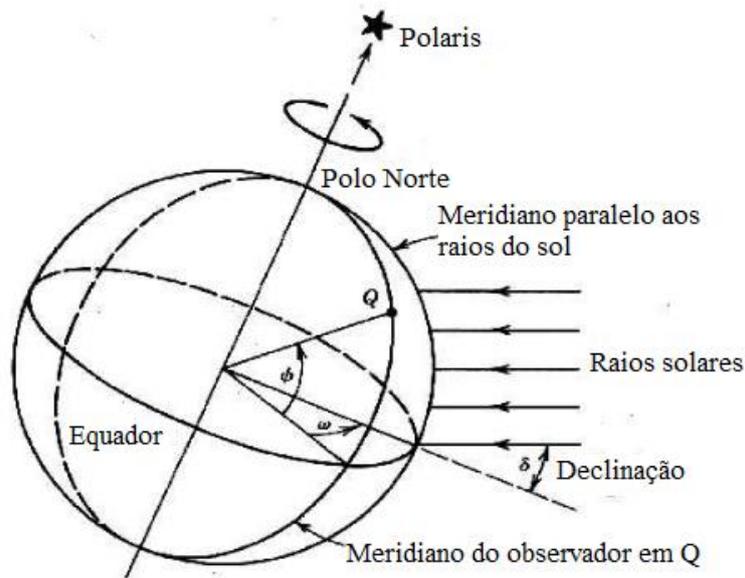


Figura 2 – Ângulos solares: declinação e horário (adaptado de Stine, 2001)

De posse dos valores calculados anteriormente e da latitude local (ϕ), aplicando-se a Eq. (3), pode-se determinar a altura solar (α), que representa o ângulo complementar do ângulo zênite, definido como o ângulo entre a linha que une o observador e o sol com o eixo perpendicular ao plano, ambos ilustrados na Fig. 3.

$$\sin \alpha = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin(\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi) \quad (4)$$

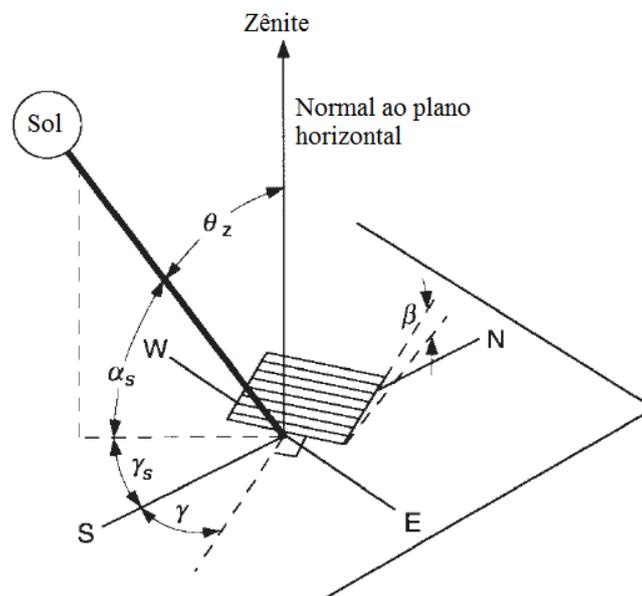


Figura 3 – Ângulos solares (adaptado de Duffie e Beckman, 2013)

3.2 Determinação do comprimento da sombra

Observando-se a Fig. 4 e aplicando a Lei dos Senos no triângulo ABC, pode-se determinar uma relação entre a distância dos painéis e a altura solar.

$$\frac{D}{\sin(180-(\alpha+\beta))} = \frac{b}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$D = b(\cos \beta + \sin \beta \cotan \alpha) \quad (6)$$

$$d = D - b \cos \beta \quad (7)$$

Sendo b o comprimento do painel e β a inclinação do mesmo em relação ao chão.

De posse das Eqs. (4) e (7), com a ajuda do código computacional é possível determinar-se os valores do comprimento da sombra gerada pelo painel fotovoltaico para qualquer hora do dia.

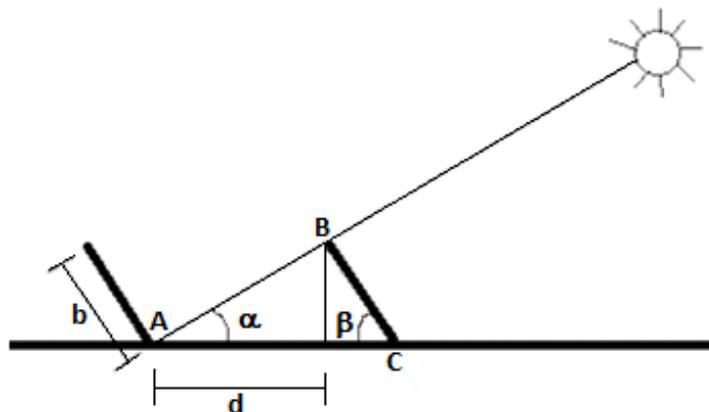


Figura 4 – Esquema de dois painéis solares

Para validação do modelo, foram usados os dados geográficos e as dimensões dos painéis aplicados no trabalho de Castellano *et al.* (2015), os mesmos são ilustrados na Tab. 1, correspondentes a uma região localizada ao sul da Espanha para o dia de solstício de inverno, onde a declinação atinge um valor máximo, evidenciando-se assim uma menor incidência solar, o que requer uma otimização no processo de geração de energia elétrica, visando-se aproveitar ao máximo a energia disponível durante o período solar.

Tabela 1 – Dados de entrada

Comprimento do painel (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Declinação (°)
1.665	37.093	-2.633	-23.45

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após alimentar o código com os dados fornecidos na Tab. 1, foram obtidos os valores ilustrados na Tab. 2, sendo d_{Ref} o valor para o comprimento da sombra assumido como referência, obtido por Castellano *et al.* (2015) e d o resultado obtido no presente trabalho.

Observando-se o erro relativo entre o valor obtido e a referência, percebe-se que o maior valor foi de 1.19%, podendo-se assim considerar desprezível a discrepância entre os dados.

Tabela 2 – Valores de comprimento da sombra

Hora Solar	8:00			10:00			12:00			14:00			16:00		
	d_{Ref} (m)	d (m)	Erro relativo (%)	d_{Ref} (m)	d (m)	Erro relativo (%)	d_{Ref} (m)	d (m)	Erro relativo (%)	d_{Ref} (m)	d (m)	Erro relativo (%)	d_{Ref} (m)	d (m)	Erro relativo (%)
$\beta=60^\circ$	11.48	11.36	1.05	3.41	3.37	1.17	2.55	2.55	0.00	3.41	3.37	1.17	11.48	11.36	1.05
$\beta=45^\circ$	9.38	9.29	0.96	2.78	2.75	1.08	2.08	2.08	0.00	2.78	2.75	1.08	9.38	9.29	0.96
$\beta=40^\circ$	8.52	8.43	1.06	2.53	2.50	1.19	1.89	1.89	0.00	2.53	2.50	1.19	8.52	8.43	1.06
$\beta=15^\circ$	3.43	3.40	0.87	1.02	1.01	0.98	0.76	0.76	0.00	1.02	1.01	0.98	3.43	3.40	0.87

Analisando-se o comportamento da sombra para as inclinações propostas durante o período solar, ilustrado na Fig. 5, percebe-se que os resultados obtidos estão de acordo com os esperados, pois evidenciou-se um maior comprimento da sombra nos períodos do nascer e pôr do sol, quando o ângulo da altura solar apresenta valores mínimos. Além disso, há uma simetria em relação ao meio dia solar, devido aos movimentos de rotação e translação da Terra.

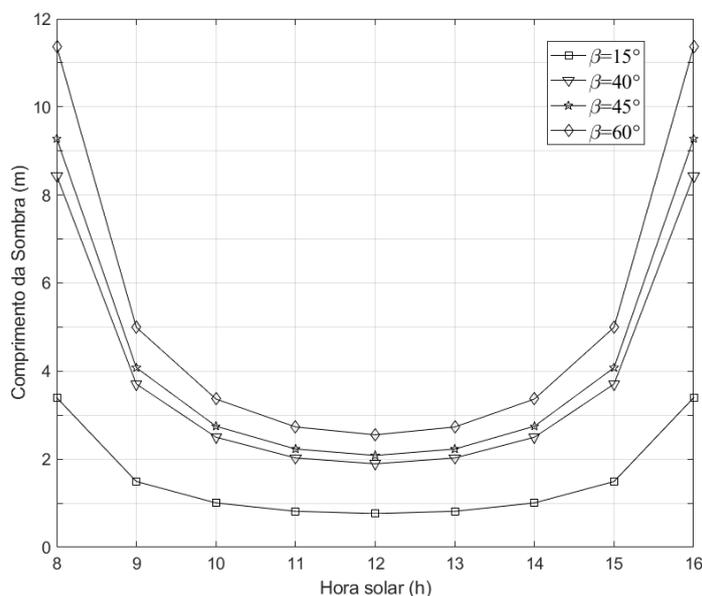


Figura 5 – Curvas do comprimento da sombra durante o dia para diversas inclinações do painel.

5. CONCLUSÃO

O método computacional proposto para análise do sombreamento entre módulos fotovoltaicos baseado no sistema de rastreamento solar visa auxiliar na determinação da distância necessária na instalação dos mesmos, influenciando assim diretamente tanto na eficiência de geração de eletricidade como na proteção do sistema contra danos causados pelo efeito do sombreamento, a exemplo do sobreaquecimento das células fotovoltaicas devido a sobrecorrente, mostrou-se válido através de comparação com resultados obtidos por Castellano *et al.* (2015). Podendo ser aplicado para qualquer região, pois necessita apenas dos dados geográficos da região em estudo e características do painel, como o seu comprimento e o ângulo de inclinação.

Sugere-se ainda a realização de um estudo prévio mais detalhado, pois para que o sistema possa operar livre de sombreamento se faz necessário um maior espaçamento entre os arranjos fotovoltaicos, o que implicará num menor aproveitamento da irradiância local, pois haverá uma menor quantidade de células solares por unidade de área, fazendo com que uma menor potência seja gerada no processo.

Agradecimentos

À toda equipe do Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LSTEA/UFRN).

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Banco de Informações de Geração: capacidade de geração do Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 22 out. 2017.
- Castellano, N.N., Parra, J.A.G., Valls-Guirado, J., Manzano-Agugliaro, F., 2015. Optimal displacement of photovoltaic array's rows using a novel shading model, *Applied Energy*, vol. 144, pp. 1-9.
- Department of Economic and Social Affairs., 2017. *World Population Prospects*.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Ishaque, K., Salam, Z., 2013. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 475-488.
- Jones, G.A., Warner, K.A., 2016. The 21st century population-energy-climate nexus, *Energy Policy*, vol. 93, pp. 201-212.

- Kandemir, E., Cetin, N.S., Borekci, S., 2017. A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 93-112.
- Ministério de Minas e Energia, 2016. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rüther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J.G., 2017, Atlas Brasileiro de Energia Solar, vol. 2.
- Stine, W.B.; Geyer, M.; *Power From the Sun*, 2001. Disponível em: <http://www.powerfromthesun.net/book.html>. Acesso em 23 ago. 2017.
- U.S. Energy Information Administration, 2017. *International Energy Outlook*.

Abstract. *In need of increasing the world energy production through renewable energy sources, it is notable the place taken by the Photovoltaic systems, which can be implemented at small land areas as well as large ones, depending on energy demand and/or land availability. Furthermore, the solar cells convert solar energy directly to electricity, implicating in only one loss by conversion. However, partial shading is a problem to be avoided, since it does not only reduce the power output but can also cause damage the solar cells. The present work proposes a study to this problem by analyzing the shade's length between two panels based on solar tracking equations and simple trigonometry implemented in the mathematical software MATLAB. In order to validate the proposed model, data used by Castellano et al. (2015) on his case study were implemented in the mathematical code and the outputs were compared. Results showed a maximum relative error of 1.19%, considered sufficiently low to validate the method, and the maximum shadow length presented at sunrise and sunset, when the solar height is lower, and increase by incrementing the panel's tilt angle.*

Key words: *Shading, PV System, Solar Energy*