

ANÁLISE DO SOMBREAMENTO ENTRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA CIDADE DE NATAL/RN

Micaela de Freitas Andrade – freitas.micaela@gmail.com

Gabriel Ivan Medina Tapia – gabriel.medina@ufrn.br

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

4. Conversão fotovoltaica

Resumo. A importância da energia elétrica é observada no cenário mundial, a partir do aumento acelerado de capacidade instalada e do consumo. O setor se divide entre diversas áreas de pesquisa e, atualmente, o avanço do desenvolvimento da energia solar têm atraído muitos investimentos e estudos. Aliado a isso, a busca por diminuição das perdas e ganho de eficiência dos módulos fotovoltaicos na geração de energia, faz com que a análise de sombreamento seja de fundamental importância para o dimensionamento ideal de um projeto. Sabendo que o sombreamento não somente interfere na eficiência, como também na utilização de espaço físico, este trabalho propõe o estudo do comprimento de sombra para painéis fotovoltaicos, analisando sua inclinação, ao longo de um ano na cidade de Natal/RN com o uso do software Engineering Equation Solver. Entre as inclinações analisadas, a configuração mais adequada foi a de inclinação igual a 10° , visto que entre as configurações de menor comprimento de sombra ela é a que também facilita a limpeza dos painéis pela ação da chuva.

Palavras-chave: Energia solar, Sombreamento, Módulos fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

Uma das fontes renováveis mais promissoras e estudadas no mundo é a solar, produzindo energia fotovoltaica com o uso de módulos fotovoltaicos. A radiação solar que chega até a superfície terrestre varia, basicamente, com o local. O Brasil possui vantagem na exploração desse tipo de energia, por apresentar uma boa média anual de incidência solar, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017).

A célula fotovoltaica é responsável por realizar a conversão da energia do Sol em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. Dentre os diversos materiais que compõe as células fotovoltaicas, as mais encontradas no mercado são feitas de silício, podendo ser encontradas como silício monocristalino, policristalino ou silício amorfo. A eficácia dessa conversão depende das características do ambiente e do material que compõe os módulos de cada sistema. Assim, além da incidência de luz sobre a superfície das células, as sombras também interferem diretamente na produção de energia.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com o tipo de ligação, como sistemas ligados à rede ou sistemas autônomos ou híbridos. Independentemente do tipo, durante a fase de projeto, um dos fatores a ser considerado é a área disponível para instalação, visto que ligações entre várias células pode demandar grande espaço. Com isso, a importância em se estudar a distância entre células para não ocasionar sombreamento possui grande relevância. Este trabalho faz uma análise de sombreamento de módulos, sombreamento previsível, ratificando a importância deste fator em projetos fotovoltaicos.

2. JUSTIFICATIVA

Um estudo mais recente, realizado pela sociedade Alemã de Energia Solar (DGS,2014), apontou que um dos fatores que representam maior perda na geração de energia fotovoltaica é o sombreamento.

Assim, segundo Gasperacco *et al.* (2017), o sombreamento é considerado como uma redução no valor da radiação solar, afetando as características da curva Tensão versus Corrente dos painéis fotovoltaicos. Esse valor da irradiação solar pode ser diferente em vários pontos do painel fotovoltaico, conhecido como sombreamento parcial. Em alguns casos o sombreamento pode ser inevitável, podendo ser causado por folhas, sujidades em geral, nuvens, ou até mesmo o próprio movimento relativo do Sol que muda durante o decorrer do ano. Além disso, quando uma célula se encontra sombreada, esta atua como uma carga, dissipando a corrente de entrada e criando os chamados pontos quentes.

Ao analisar a curva característica corrente versus tensão do sistema, mostrada na Fig.1, evidencia-se os efeitos causados pelo sombreamento no comportamento dos módulos em operação.

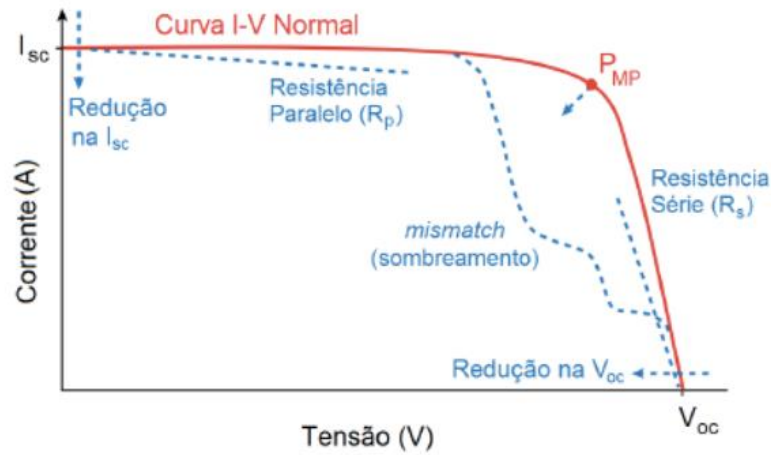


Figura 1. Curva comparativa da corrente versus tensão para módulo normal e sombreado (Pinho e Galdino 2014).

3. METODOLOGIA

A fim de buscar conhecer o comportamento do sombreamento durante todo o ano na cidade de Natal/RN, os dias 21/09, 21/12, 21/03 e 21/06 foram avaliados, sendo os dias correspondentes ao início da primavera, verão, outono e inverno, respectivamente. Com esses dados, o software *Engineering Equation Solver* foi utilizado na resolução das equações que determinam o ângulo de inclinação solar, a distância mínima necessária para evitar que um módulo sombreie o outro e a incidência solar anual. Além disto, o movimento do Sol durante o dia também foi considerado, em que foram estudados os horários locais entre 8:00 e 16:00.

3.1 Rastreamento solar

Para determinar a posição do Sol ao longo do dia, é necessário definir os ângulos solares que a descrevem, sendo eles o ângulo horário, declinação, altitude solar, ângulo do zênite e do azimute.

A inclinação do eixo terrestre faz com que a orientação da Terra em relação ao Sol mude ao longo do ano. Assim Cooper (1969), propôs que a declinação percebida por um observador no equador terrestre em um dado dia do ano pode ser determinado por:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 * \frac{284+n}{365} \right) \quad (1)$$

Sendo δ a declinação solar em graus e o n o dia solar, neste trabalho, como citado anteriormente, são os dias correspondentes ao início da primavera, verão, outono e inverno.

Devido aos movimentos de rotação e translação da Terra, o ângulo de incidência dos raios solares varia ao longo do dia. Segundo Pinho e Galdino 2014, sendo T o horário local, o ângulo horário ω , em graus, pode ser calculado por

$$\omega = (T - 12) * 15^\circ \quad (2)$$

Sabendo que a altura solar é o ângulo completar ao ângulo zênite e está relacionada ao percurso dos raios solares na atmosfera, temos

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

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos \varnothing \cos \delta \cos \omega + \sin \varnothing \sin \delta) \quad (4)$$

Onde θ é o ângulo de incidência da radiação em graus, \varnothing é a latitude do local em graus e α é a altura solar em graus.

Considerando que análise presente neste trabalho foi realizada para cidade de Natal/RN, temos os dados locais presentes na Tab. 1.

Tabela 1. Dados locais.

Local	Latitude \varnothing	Longitude
Natal/RN	-5,813°	-35,26°

3.2 Determinação do comprimento da sombra

Para determinação do comprimento da sombra, as dimensões do módulo devem ser consideradas, assim como sua orientação. Neste trabalho, considerou-se os módulos *Canadian 330Wp*, com dimensões apresentadas na Tab. 2, na orientação paisagem. Assim, na estrutura considerada, mostrado na Fig. 2, a largura do módulo é de 0,992m.

Tabela 2. Informações do módulo estudado.

Módulo	Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)
<i>Canadian 330Wp</i>	1,96	0,992	0,040

De posse dos dados, o comprimento da sombra gerada pelo módulo fotovoltaico pode ser determinado por:

$$d = \left(\frac{b \cdot \sin(180 - \beta - \alpha)}{\sin \alpha} \right) \quad (5)$$

Em que b representa a largura do módulo (m), d é a distância entre os módulos (m) e β é a inclinação do módulo ($^\circ$).

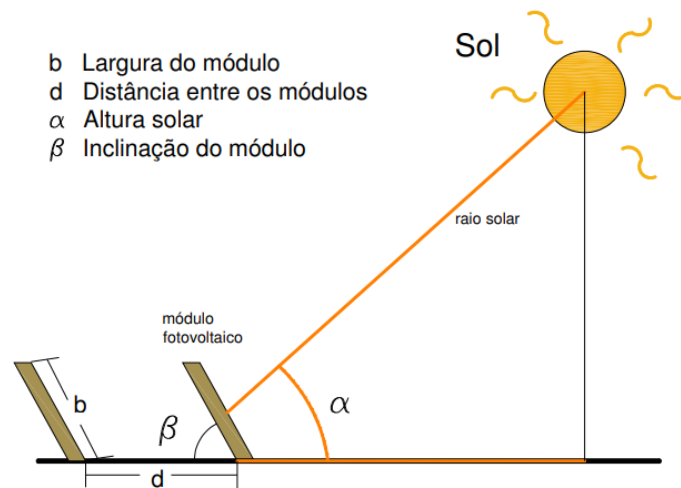


Figura 2. Estrutura esquemática para análise do sombreamento dos módulos (Barros, 2011).

De posse das equações e com o auxílio computacional, é possível determinar o comprimento da sombra dos módulos durante todo o dia.

3.3 Melhor aproveitamento da incidência solar

Com a finalidade de buscar a melhor orientação dos módulos para captar a maior incidência anual, fez necessário o cálculo da irradiância solar diária (H_o , em J/m^2), em que pode ser calculada a partir da seguinte equação.

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (6)$$

Onde G_{sc} é a constante solar e, segundo Duffie (2013), é igual a $1367 W/m^2$. ω_s representa o ângulo horário do nascimento do Sol ($^\circ$). O ângulo de nascimento do Sol pode ser encontrado por:

$$\cos \omega_s = \frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse de todos os dados, com o auxílio do software, foram obtidos os resultados da sombra (d) apresentados nas Tab. 3, 4, 5 e 6, para as inclinações dos módulos estudadas ($\beta=5^\circ$; $\beta=10^\circ$; $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$).

Tabela 3. Resultados obtidos para o início da primavera, dia 21/09.

21/09						
Horário	ω (°)	α (°)	$d(\beta=5^\circ)$	$d(\beta=10^\circ)$	$d(\beta=15^\circ)$	$d(\beta=30^\circ)$
8:00	-60	29,85	1,1389	1,2771	1,4056	1,7234
9:00	-45	44,73	1,0755	1,1508	1,2174	1,3598
10:00	-30	59,53	1,039	1,0782	1,1092	1,1509
11:00	-15	74,00	1,0130	1,0263	1,0318	1,0013
12:00	0	84,39	0,997	0,9938	0,9834	0,9078
13:00	15	74,00	1,0130	1,0263	1,0318	1,0013
14:00	30	59,53	1,039	1,0782	1,1092	1,1509
15:00	45	44,73	1,0755	1,1508	1,2174	1,3598
16:00	60	29,85	1,1389	1,2771	1,4056	1,7234

Tabela 4. Resultados obtidos para o início do verão, dia 21/12.

21/12						
Horário	ω (°)	α (°)	$d(\beta=5^\circ)$	$d(\beta=10^\circ)$	$d(\beta=15^\circ)$	$d(\beta=30^\circ)$
8:00	-60	29,78	1,139	1,2779	1,4069	1,7258
9:00	-45	43,29	1,08	1,1598	1,2307	1,3856
10:00	-30	56,17	1,046	1,0924	1,1303	1,1915
11:00	-15	67,20	1,0246	1,0493	1,0661	1,0676
12:00	0	72,36	1,0157	1,0317	1,0398	1,0168
13:00	15	67,20	1,0246	1,0493	1,0661	1,0676
14:00	30	56,17	1,046	1,0924	1,1303	1,1915
15:00	45	43,29	1,08	1,1598	1,2307	1,3856
16:00	60	29,78	1,139	1,2779	1,4069	1,7258

Tabela 5. Resultados obtidos para o início do outono, dia 21/03.

21/03						
Horário	ω (°)	α (°)	$d(\beta=5^\circ)$	$d(\beta=10^\circ)$	$d(\beta=15^\circ)$	$d(\beta=30^\circ)$
8:00	-60	29,88	1,1387	1,2767	1,405	1,7224
9:00	-45	44,76	1,0754	1,1506	1,2171	1,3593
10:00	-30	59,57	1,039	1,0781	1,109	1,1504
11:00	-15	74,08	1,0129	1,0261	1,0314	1,0006
12:00	0	84,59	0,996	0,9932	0,9825	0,906
13:00	15	74,08	1,0129	1,0261	1,0314	1,006
14:00	30	59,57	1,039	1,0781	1,109	1,1504
15:00	45	44,76	1,0754	1,1506	1,2171	1,3593
16:00	60	29,88	1,1387	1,2767	1,405	1,7224

Tabela 6. Resultados obtidos para o início do inverno, dia 21/06.

21/06						
Horário	ω (°)	α (°)	$d(\beta=5^\circ)$	$d(\beta=10^\circ)$	$d(\beta=15^\circ)$	$d(\beta=30^\circ)$
8:00	-60	24,63	1,1768	1,353	1,518	1,94
9:00	-45	37,23	1,102	1,2036	1,2961	1,5118
10:00	-30	48,66	1,064	1,128	1,184	1,295
11:00	-15	57,28	1,0438	1,0876	1,1231	1,1778
12:00	0	60,82	1,036	1,073	1,101	1,136
13:00	15	57,28	1,0438	1,0876	1,1231	1,1778
14:00	30	48,66	1,064	1,128	1,184	1,295
15:00	45	37,23	1,102	1,2036	1,2961	1,5118
16:00	60	24,63	1,1768	1,353	1,518	1,92

Ao analisar os comportamentos do sombreamento para os dias e inclinações propostas, ilustrados nas Fig. 3, 4, 5 e 6, é notável que em períodos de nascer ou pôr do Sol o comprimento da sombra aumenta, assim como também aumenta com o aumento da inclinação do módulo. Além disso, devido aos movimentos de rotação e translação da Terra, também se observa simetria em relação ao meio dia solar.

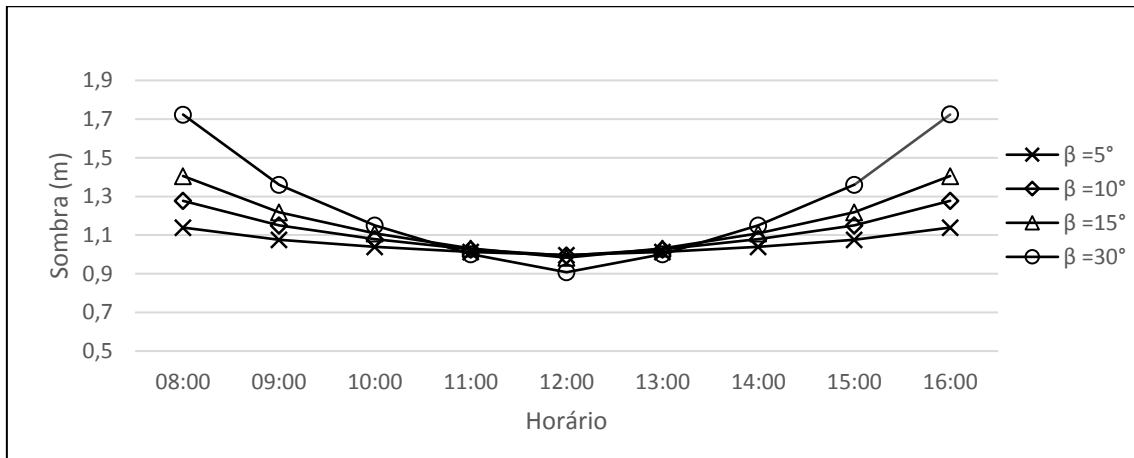


Figura 3. Análise de sombreamento no dia 21/09 com variação da inclinação do módulo.

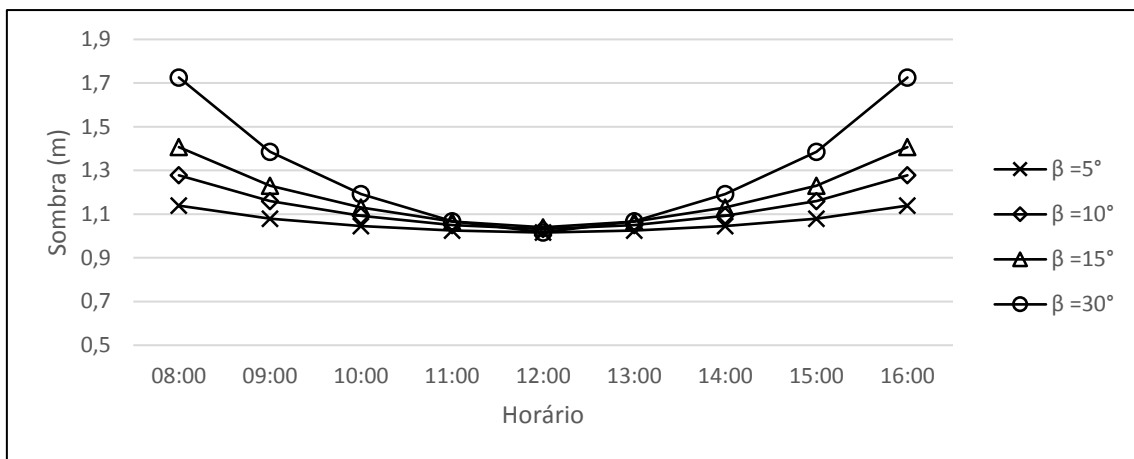


Figura 4 . Análise de sombreamento no dia 21/12 com variação da inclinação do módulo.

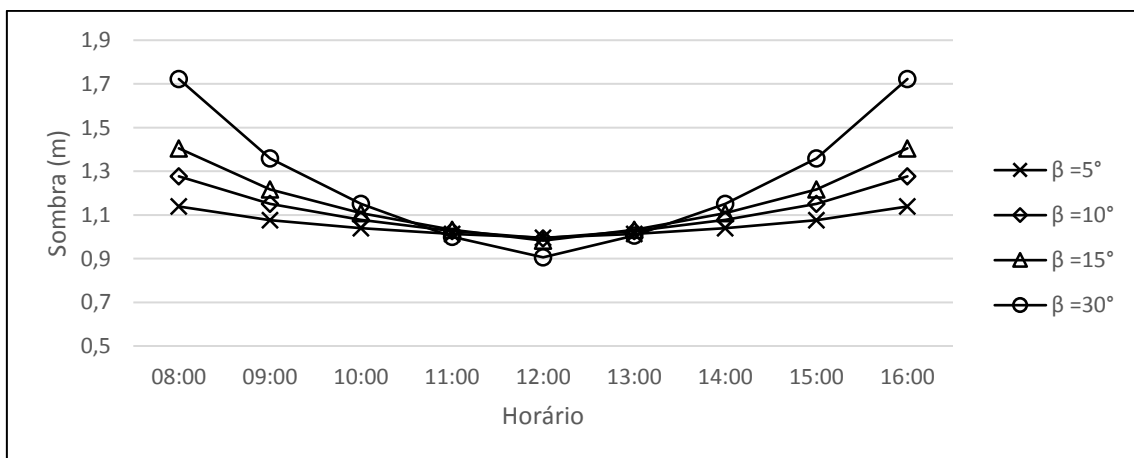


Figura 5. Análise de sombreamento no dia 21/03 com variação da inclinação do módulo.

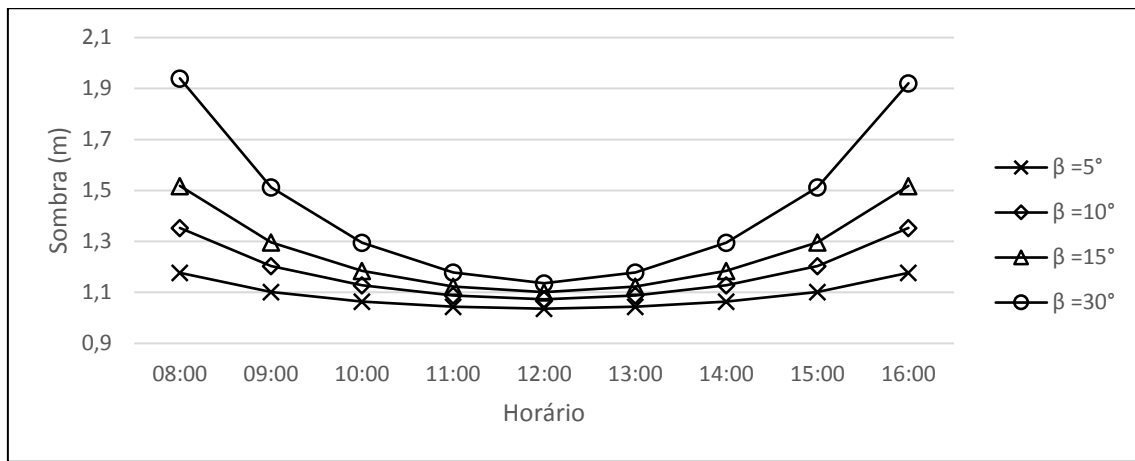


Figura 6. Análise de sombreamento no dia 21/06 com variação da inclinação do módulo.

Com os dados obtidos também foi possível realizar um estudo do comprimento da sombra ao longo de um ano, para as inclinações analisadas. Desta forma, percebe-se que na configuração com inclinação de 10° o comprimento da sombra não possui alteração significativa.

Outro ponto estudado foi a capacidade do módulo captar a maior incidência anual, de acordo com sua inclinação e orientação. Na Tab. 7, evidencia-se a variação da inclinação solar e confirma-se a necessidade de estudar o comportamento da irradiância diária a fim de gerar a maior quantidade de energia possível.

Tabela 7. Resultados da irradiância.

Dia	n	δ (°)	ω_s (°)	Ho (MJ/m ²)
21/09	264	-0,2018	90,02	37,22
21/12	355	-23,45	92,53	37,92
21/03	80	-0,4036	90,04	37,68
21/06	172	23,45	87,47	30,93

5. CONCLUSÃO

O método proposto tem como objetivo auxiliar na análise de sombreamento, parâmetro de grande importância, visto que influencia diretamente na eficiência de geração elétrica e também a proteção dos equipamentos. Isso porque, como citado por Pinho e Galdino, 2014, o sombreamento pode causar risco ao módulo por gerar pontos quentes nos módulos.

Sabendo que uma das causas de sombreamento é a sujidade, ao considerar a limpeza dos módulos pela ação da chuva e o comportamento do sombreamento nas inclinações estudadas, observou-se que a inclinação de 10° apresentou comportamento adequado para a cidade de Natal.

Futuramente, em um estudo mais detalhado com a análise de dados experimentais, espera-se obter dados mais próximos à realidade. Sendo possível uma estimativa mais fiel do espaço necessário para execução de um projeto, de acordo com a análise econômica avaliando o ganho da geração, devido a inclinação, e o custo com estrutura e espaço.

Agradecimentos

Ao professor Doutor Gabriel Ivan Medina Tapia e à toda equipe do Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LSTEA/UFRN).

REFERÊNCIAS

- Barros, H. A., 2011. Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12kWp conectado à rede. UFRJ/Escola Politécnica.
- Campos, G. A. P., Silva, J. P. G., 2020. Rastreador solar impresso: um projeto open source, VIII CBENS - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- DGS - German Solar Energy Society, 2014. Planning and Installing Photovoltaic Systems.
- Duffie, J. A. Beckam, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Process. John Wiley & Sons.

- Gasparacco, W., Rocha, T.S.; Mazzoco, G., Fardin, J. F., Simonetti, D.S. L., 2017. Rede Neural Artificial Aplicada ao Rastreamento de Pontos de Máxima Potência de Painéis Fotovoltaicos com Sombreamento Parcial, Blucher Proceedings, VIII Encontro Científico de Física Aplicada.
- Pereira, N. X., 2019. Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada, Dissertação de mestrado. UNESP, Sorocaba.
- Pinho, J. T.; Galdino, M. A., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CRESESB.
- Souza, D. V., Tapia, G. I. M., 2018. Análise do sombreamento entre painéis fotovoltaicos, VII CBENS - VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.

ANALYSIS OF SHADOWING BETWEEN PHOTOVOLTAIC PANELS IN THE CITY OF NATAL/RN

Abstract. *The importance of electric energy is observed on the world stage based on the accelerated increase in installed capacity and consumption. The sector is divided between several areas of research and currently the advance in the development of solar energy has attracted many investments and studies. Allied to this the search for reduction of losses and efficiency gains of photovoltaic modules in energy generation makes the shading analysis of fundamental importance for the ideal dimensioning of a project. Knowing that shading not only interferes with efficiency but also with the use of physical space, this work proposes the study of the shadow length for photovoltaic panels analyzing their inclination over a year in the city of Natal/RN utilizing software Engineering Equation Solver. Among the analyzed slopes the most adequate configuration was the inclination equal to 10° because this present the smallest shadow length and it is also the one that facilitates the cleaning of the panels due to the action of rain.*

Key words: *Solar Energy, Shading, Photovoltaic modules.*