

ANÁLISE TEÓRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E SUA INFLUÊNCIA NA PERFORMANCE DE UMA PLACA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO

Nícolas Matheus da Fonseca Tinoco de Souza Araújo. nicolas.tinoco@hotmail.com

Felipe Pinheiro Maia. felipepm99@hotmail.com

Juliana Ricardo de Souza. julianars.materiais@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Engenharia Mecânica. Avenida Senador Salgado Filho, S/N. Caixa Postal 1524 - Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP 59072-970, Natal-RN, Brasil.

Resumo: A série de problemas ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis, principal fonte de energia atual, exige uma necessidade urgente de desenvolvimento e a utilização de tecnologias de energia renovável, a fim de lidar com os desafios políticos, econômicos e ambientais envolvidos na geração de energia elétrica. A energia fotovoltaica se destaca dentre as fontes de energia alternativas devido às suas várias vantagens sobre as demais. Enquanto isso, o Nordeste brasileiro, com grande disponibilidade da força motriz desta tecnologia, ainda sofre com problemas de energia pelo fato de suas autoridades não reconhecerem seu potencial. Assim, o objetivo deste trabalho é mostrar a potencialidade e desta fonte de energia por meio da modelagem da transferência de calor teórica de um módulo PV de acordo a sua eficiência em função das condições ambientes (temperatura, velocidade do vento e irradiação). Conclui-se que a radiação é o principal parâmetro no comportamento da potência do módulo PV e que é viável, tecnicamente, a utilização do módulo PV para a cidade de Natal – cidade localizada no nordeste brasileiro – sob as condições climáticas do intervalo de tempo analisado. A temperatura influencia negativamente, enquanto a velocidade do vento influencia positivamente na potência do módulo PV.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico, Transferência de Calor, Parâmetros Influenciadores, Energia Solar.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e do desenvolvimento tecnológico e econômico, os seres humanos precisam de mais energia para criar um ambiente de vida melhor. No entanto, a queima de combustíveis fósseis tradicionais está causando uma série de problemas ambientais, tais como mudanças climáticas, aquecimento global, poluição do ar e chuva ácida (Peng *et al*, 2013; Bhattacharya *et al*, 2014 e Tyagi *et al*, 2013).

Portanto, existe uma necessidade urgente de desenvolvimento de tecnologias de energia renovável, a fim de lidar com os desafios políticos, econômicos e ambientais envolvidos na geração de energia elétrica. A aparência de tais energias nos últimos anos impulsionou em grande parte o interesse entre pesquisadores, políticos e líderes da indústria em entender a viabilidade econômica da nova fonte de energia (Bhattacharya *et al*, 2014; Kim *et al*, 2014 e Sampaio e González, 2017).

A captação de energia solar através de painéis fotovoltaicos para produzir eletricidade é considerada um dos produtos mais efetivos, sustentáveis e ecológicos no campo das energias renováveis. A conversão direta de radiação solar em eletricidade (Hosenuzzaman *et al*, 2015b e Ahmed *et al*, 2013) ocorre devido ao efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Becquerel em 1839 (Hosenuzzaman, 2015a; Goetzberger *et al*, 2002; Goetzberger *et al*, 2003; Brabec, 2004 e Spanggaard e Krebs, 2004). O material semicondutor mais utilizado é o silício, segundo elemento mais abundante na Terra.

Diante disso, o uso da mesma é presente tanto em aplicações no espaço quanto no planeta Terra, são exemplos: nave espacial, bombeamento de água, iluminação da rua, construção com sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV), telecomunicação, dessalinização de água, satélites e monitoramento do tempo (Chaar *et al*, 2011).

1.1. O Nordeste brasileiro e a energia fotovoltaica

O Nordeste brasileiro apresenta o maior potencial de radiação solar do país, proveniente do clima semiárido somado a baixa precipitação e cobertura de nuvens, com valores médios anuais de 4,8 a 6,0 kWh/m² (SUDENE, 2016), os quais podem ser utilizados para trazer um desenvolvimento sustentável, saúde e bem-estar social para as populações, além de

possibilitar a substituição gradativa da utilização da madeira como fonte de energia que ainda representa 35% da matriz energética da região semiárida. A Figura 1 mostra a distribuição da radiação solar no Nordeste brasileiro.

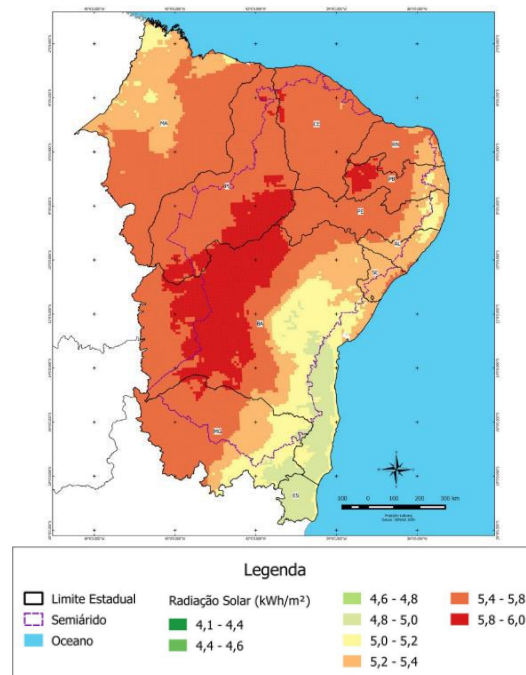


Figura 1 - Radiação Solar (média anual) na área de atuação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Fonte: (SUDENE, 2016).

1.2. Framework

Na prática, apenas 15-25% da irradiação solar incidente é convertida em eletricidade, e o resto é transformado em calor (Goetzberger *et al*, 2003 e Teo *et al*, 2012).

Um dos principais parâmetros que influenciam o desempenho de um painel fotovoltaico é a temperatura da superfície. Essa temperatura aumenta conforme aumenta o tempo de exposição ao sol, dependendo também de outros fatores, como a velocidade de vento, o material, a absorvidade do painel, etc.

Visto que a potência nominal de uma célula fotovoltaica é definida pela multiplicação entre a corrente de curto circuito, a tensão de circuito aberto e o fator de preenchimento e que, conforme observado por Dubey *et al* (2013), o aumento de temperatura contribui para a diminuição desses dois últimos fatores em razão da excitação térmica dos elétrons que afeta as propriedades térmicas do semicondutor, assim, a eficiência do módulo fotovoltaico diminui à medida que a temperatura do módulo aumenta (Kui-Qing e Shuit-Tong, 2011).

Muitos modelos já foram propostos para descrever essa relação (Dubey *et al*, 2013). Em geral, considera-se uma temperatura de referência conhecida como Temperatura Nominal de Operação da Célula (NBR 10899, 2013), a partir da quais a eficiência varia com a variação da temperatura. Por exemplo, Fouad *et al* (2017) estabelece que para um acréscimo de 5 °C, a eficiência cai por volta de 1,5%. Radziemska (2003) investigou experimentalmente o efeito da temperatura e encontrou uma diminuição de cerca de 0,65% de potência de saída e 0,08% de eficiência de conversão do módulo PV por cada aumento de 1 K na temperatura da célula.

Nesse trabalho, é tido como objetivo mostrar a potencialidade desta fonte de energia por meio da modelagem da transferência de calor teórica de um painel fotovoltaico de silício ordinário de acordo a sua eficiência em função das condições ambientes (temperatura, velocidade do vento e irradiação). Para alcançar esse propósito, utilizou-se dados da cidade de Natal – Rio Grande do Norte, Brasil – disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), e o programa computacional Maxima®. Seguindo essa parte introdutória, a metodologia em detalhes é descrita na Seção 2. Os resultados e discussões são apresentados na Seção 3. E finalmente, as Conclusões na Seção 4.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Painel fotovoltaico

Para a análise do sistema, é preciso definir sua composição. Dessa forma, estabelece-se que o painel fotovoltaico aqui modelado consiste em (da camada superior para a camada inferior) uma camada de 3 mm de espessura de vidro dopado com Cerium (k_v), uma camada de 0.1 mm de substância adesiva (k_{sa}), uma fina camada de silício onde ocorre a conversão de energia solar-elétrica seguida de uma camada de 0.1 mm de solda (k_s), e mais uma camada de substrato de nitrato de alumínio com 2 mm de espessura (k_{na}).

Além disso, outras considerações podem ser feitas. Sabe-se que a eficiência η da conversão da energia solar-elétrica na camada de silício decresce com o aumento da temperatura do silício (T_{si}) e terá seus modelos a serem avaliados apresentados na subseção a seguir. A irradiação solar incidente, G , é função, basicamente, de duas variáveis, tempo e localização, de forma que para este estudo serão utilizados os dados do dia 01 de janeiro de 2016 da cidade de Natal. Admitir-se-á sendo 7% refletida a partir do topo da superfície do vidro, 10% é absorvido na superfície superior do vidro e 83% é transmitida e absorvida na camada de silício. Parte da irradiação absorvida no silício é convertida em energia térmica e o restante é convertida em energia elétrica. O vidro possui emissividade (ϵ) de 0,9, e a superfície inferior, assim como as laterais do painel, são isoladas termicamente. Este módulo PV possui uma área (A_p) de 1 m². A potência elétrica denominar-se-á, P .

Ainda, a temperatura ambiente (T_{amb}) e o valor do coeficiente convectivo (h_c), que dependerá da velocidade do vento local, foram encontrados por meio dos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE). Os dados utilizados e necessários a este trabalho se encontram descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Resumos dos dados utilizados.

Dado	Valor	Descrição
k_v	1,4 W/m.K	Coefficiente condutivo do vidro dopado com Cerium
k_{sa}	145 W/m.K	Coefficiente condutivo da substância adesiva
k_s	50 W/m.K	Coefficiente condutivo da solda
k_{na}	120 W/m.K	Coefficiente condutivo do substrato de nitrato de alumínio
ϵ	0,9	Emissividade do vidro
A_p	1 m ²	Área do módulo PV
G	$G(\text{Natal/RN}, 01/01/2016, \text{hora})$	Irradiação solar incidente
T_{amb}	$T(\text{Natal/RN}, 01/01/2016, \text{hora})$	Temperatura ambiente
h_c	$h(v_{vento})$	Coefficiente convectivo do ar
v_{vento}	$v(\text{Natal/RN}, 01/01/2016, \text{hora})$	Velocidade do vento
η	$\eta(T_{si}, \text{autor})$	Eficiência da conversão da energia solar-elétrica

2.2. Eficiência de conversão e coeficiente convectivo

As equações que descrevem ambas características, eficiência de conversão da energia solar-elétrica e o coeficiente convectivo, foram propostas por Radziemska (2003) e Incropera *et al* (2011). Estes modelos se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Eficiência da conversão da energia solar-elétrica e coeficiente convectivo.

Modelo	Equação	Condições	Autor
Coefficiente convectivo	$h = 10,9 \cdot V^{0,8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	-	Radziemska (2003)
Eficiência de conversão	$\eta = 0,553 - 0,001 \cdot T_{si}$	$(300K < T_{si} < 525K)$	Incropera <i>et al</i> (2011)

2.3. Radiação, coeficiente convectivo e temperatura ambiente

Após os dados serem adquiridos do INPE, considerou-se somente a faixa de horário em que há radiação solar, e assim geração de energia. Para os dados, a faixa definida foi de 420 a 1200 min (07:00 às 20:00), foram retirados os ruídos advindo de possíveis cobrimento por parte das nuvens ou erros aleatórios de medição, e então, gerou-se os gráficos da Figura 2.

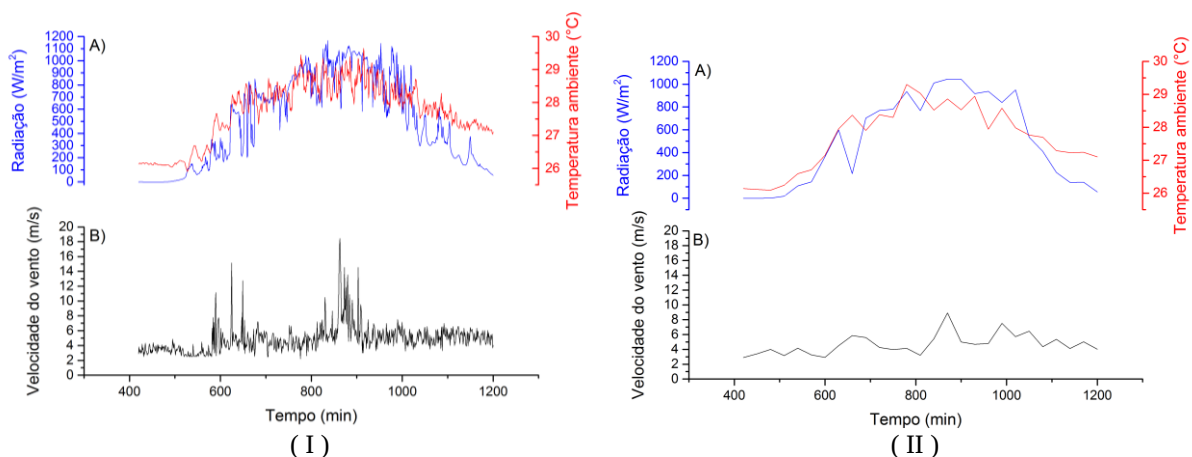


Figura 2. Dados: Natal/RN dia 01/01/2016. (I) Com ruídos: a) Radiação e temperatura ambiente; b) Velocidade do vento. (II) Sem ruídos: a) Radiação e temperatura ambiente; b) Velocidade do vento.

2.4. Modelagem do sistema

Após estabelecidos todos os parâmetros necessários à modelagem do sistema, considerou-se algumas condições para possibilitar o modelamento do mesmo, conforme (Figura 3) e analisado. As considerações são: 1) Condições de regime permanente; 2) Transferência de calor unidimensional; 3) Propriedades constantes; 4) Resistências de contato desprezíveis; 5) Diferenças de temperatura desprezíveis dentro da camada de silício.

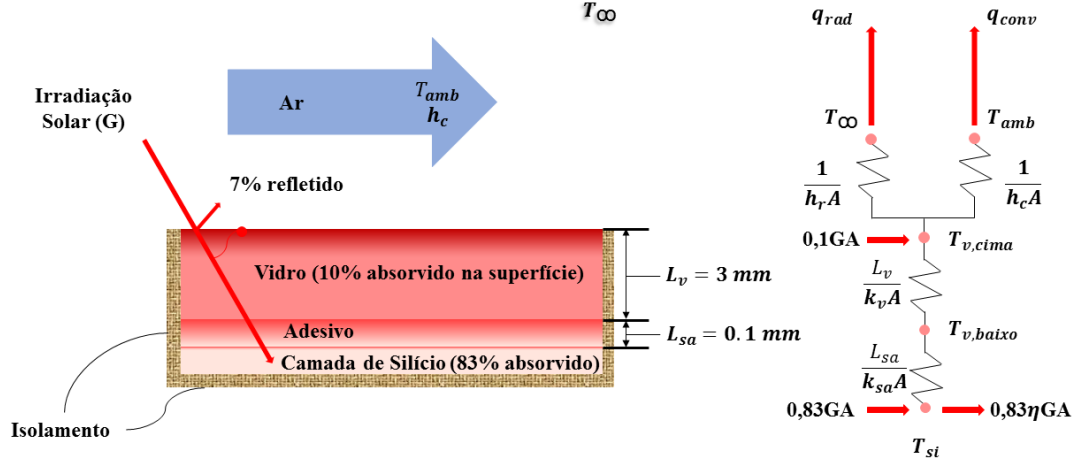


Figura 3. Sistema proposto modelado.

Reconhecendo que não há transferência de calor na superfície inferior do painel solar, tendo em vista que está isolado termicamente. Portanto, a camada de solda e o substrato de nitrato de alumínio não afetam na solução deste problema, e toda a energia solar absorvida pelo painel deve, finalmente, deixar o painel na forma de transferência de calor por radiação e convecção a partir da superfície superior do vidro, e na forma de energia elétrica para a rede, onde $P = 0.83G\eta A$. Realizando um balanço de energia no nó associado à camada de silício nos leva a:

$$0.83GA - 0.83G\eta A = \frac{T_{si} - T_{v,cima}}{\frac{L_{sa}}{k_{sa}A} + \frac{L_v}{k_vA}}$$

Simplificando:

$$0.83GA(1 - \eta) = \frac{T_{si} - T_{v,cima}}{\frac{L_{sa}}{k_{sa}A} + \frac{L_v}{k_vA}}$$

Substituindo a expressão para a eficiência de conversão da energia solar-para-elétrica, que foi apresentada na Tabela 3, e, simplificando, nos leva a:

$$0.83G(1 - a + bT_{si}) = \frac{T_{si} - T_{v,cima}}{\frac{L_{sa}}{k_{sa}} + \frac{L_v}{k_v}} \quad (1)$$

Realizando um segundo balanço de energia no nó associado à superfície superior do vidro nos dá:

$$0,83GA(1 - \eta) + 0.1GA = hA(T_{v,cima} - T_{amb}) + \varepsilon\sigma A(T_{v,cima}^4 - T_{amb}^4)$$

Substituindo a expressão para a eficiência de conversão da energia solar-para-elétrica e, simplificando, nos leva a:

$$0,83G(1 - a + bT_{si}) + 0.1G = h(T_{v,cima} - T_{amb}) + \varepsilon\sigma(T_{v,cima}^4 - T_{amb}^4) \quad (2)$$

E para a potência do módulo:

$$P = 0,83G(1 - a + bT_{si})A \quad (3)$$

A partir das relações das estabelecidas na Tabela 2, substituindo os dados conhecidos nas Equações 1 e 2, e então resolvendo o sistema linear formado, obteve-se a temperatura do silício (T_{si}) e a temperatura da superfície externa do

vidro ($T_{v,ctma}$). A partir destes dados, tornou-se possível o cálculo da potência gerada (Equação 3). As equações foram resolvidas através do *software* Maxima®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo o descrito na Seção 2 deste trabalho, foi possível obter os resultados referentes ao coeficiente convectivo local, a potência do módulo PV e a temperatura do silício. Para melhor compreensão do sistema, utilizou-se dos dados iniciais para se fazer algumas relações. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 4 e 5.

Observa-se que a potência do módulo se comporta de forma semelhante à radiação nele incidente. Os poucos pontos onde isso não ocorre, há um aumento ou redução brusca da temperatura do silício. Fenômenos apresentados pela Figura 4. Essa variação na temperatura é regida pelo comportamento do coeficiente convectivo, ou seja, da velocidade dos ventos locais. Na Figura 5 é possível observar que mesmo com um aumento da radiação, ainda há casos de redução da temperatura decorrente do aumento do coeficiente convectivo (aumento da velocidade do vento), e estas reduções, por sua vez, otimizam a eficiência da placa, aumentando assim, a inclinação da curva da potência do módulo.

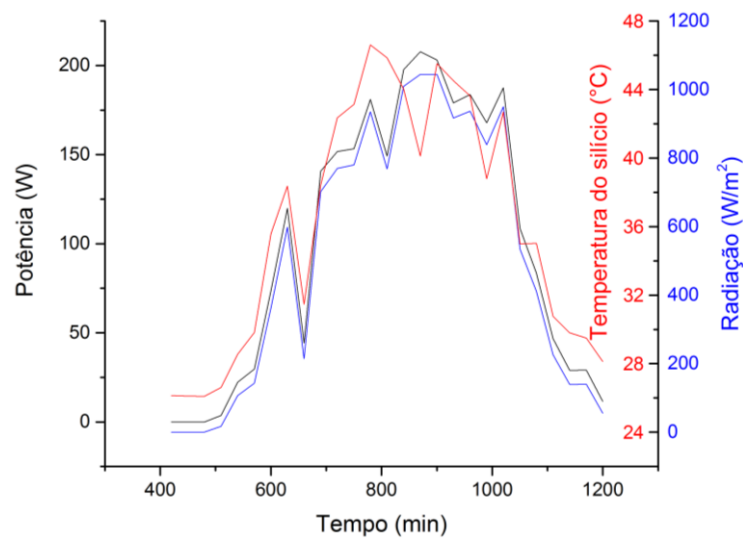


Figura 4. Variação diária da potência, radiação e temperatura do silício.

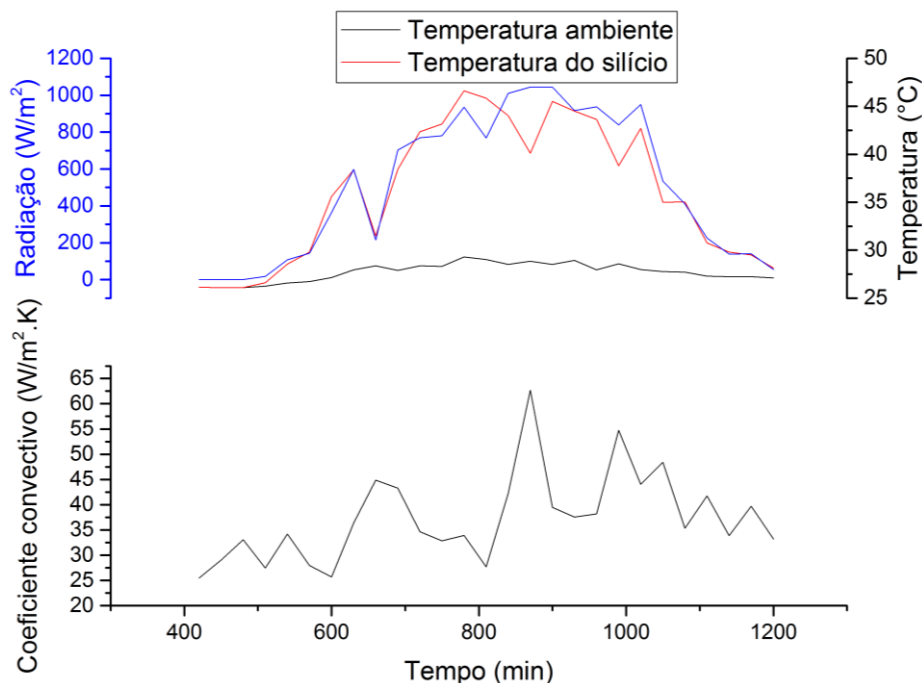


Figura 5. Variação diária da radiação, do coeficiente convectivo e das temperaturas ambiente e do silício.

4. CONCLUSÃO

Após o módulo fotovoltaico ordinário de silício ser modelo e ter sua transferência de calor analisada conforme a literatura e dados obtidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para a cidade de Natal/Rio Grande do Norte/Brasil, pôde-se concluir que:

1. A radiação é o principal parâmetro para descrever o comportamento da potência de um módulo PV;
2. A temperatura influi negativamente na potência do módulo PV, enquanto a velocidade do vento (coeficiente convectivo) influi positivamente;
3. As condições climáticas do intervalo de tempo analisado indicam viabilidade técnica para a utilização do módulo PV para a cidade de Natal.

5. REFERÊNCIAS

- Ahmed F, Al Amin AQ, Hasanuzzaman M, Saidur R. Alternative energy resources in Bangladesh and future prospect. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 25:698–707.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10899: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. 2013. 16 p.
- Bhattacharya T, Chakraborty AK, Pal K. Effects of ambient temperature and wind speed on performance of monocrystalline solar photovoltaic module in Tripura, India. *J Sol Energy* 2014; 2014:1–5.
- Brabec CJ. Organic photovoltaics: technology and market. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2004; 83:273–92.
- Chaar LE, Lamont LA, Zein NE. Review of photovoltaic technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:2165–75.
- Dubey, Swapnil; Sarvaiya, Jatin Narotam; Seshadri, Bharath. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, v. 33, p. 311–321, 2013. Elsevier BV.
- Fouad, M.m.; Shihata, Lamia A.; Morgan, Elsayed I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 80, p.1499–1511, dez. 2017. Elsevier BV.
- Goetzberger A, Hebling C, Schock HW. Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Mater Sci Eng: R: Rep* 2003; 40(1): 1–46.
- Goetzberger A, Luther J, Willeke G. Solar cells: past, present, future. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2002; 74:1–11.
- Hosenuzzaman M, et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renew Sustain Energy Rev* 2015a; 41:284–97.
- Hosenuzzaman M, Rahim NA, Selvaraj J, Hasanuzzaman M, Malek ABMA, Nahar A. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renew Sustain Energy Rev* 2015b; 41:284–97.
- Incropera F P, Dewitt D P, Bergman T L, Lavine A S. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons. 7ed. USA. 2011. 978-0470-50197-9
- Kim H, Park E, Kwon SJ, Ohm JY, Chan HJ. An integrated adoption model of solar energy technologies in South Korea. *Renew Energy* 2014; 66:523–31.
- Kui-Qing P, Shuit-Tong L. Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion. *Adv Mater* 2011;23, [198–21].
- Peng J, Lu L, Yang H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 19:255–74.
- Radziemska E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renew Energy* 2003; 28(1):1–12.
- Sampaio PGV, González MOA. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017) 590–601.
- Spanggaard H, Krebs FC. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2004; 83:125–46.
- Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Nordeste em números 2015. Recife: SUDENE, 2016. 268 p.
- Teo HG, Lee PS, Hawlader MNA. An active cooling system for photovoltaic modules. *Appl Energy* 2012; 90(1):309–15.
- Tyagi VV, Rahim NAA, Rahim NA, Selvaraj JAL. Progress in solar PV technology: research and achievement. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 20:443–61.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THEORETICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER AND ITS INFLUENCE ON THE PERFORMANCE OF A SILICON PHOTOVOLTAIC MODULE

Nícolas Matheus da Fonseca Tinoco de Souza Araújo. nicolas.tinoco@hotmail.com

Felipe Pinheiro Maia. felipepm99@hotmail.com

Juliana Ricardo de Souza. julianars.materiais@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Engenharia Mecânica. Avenida Senador Salgado Filho, S/N. Caixa Postal 1524 - Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP 59072-970, Natal-RN, Brasil

Abstract. *The series of environmental problems caused by the fossil fuels burning, the main current source of energy, requires an urgent need for development and the use of renewable energy technologies in order to deal with the political, economic and environmental challenges involved in the generation of electrical energy. Photovoltaic energy stands out among alternative energy sources because of its various advantages. Meanwhile, the Brazilian Northeast, with great availability of this driving force of this technology, still suffers from energy problems because its authorities do not recognize its potential. Thus, the objective of this work is to show the potentiality of this energy source by modeling the theoretical heat transfer of a PV module according to its efficiency depending on the ambient conditions (temperature, wind speed and irradiation). It is concluded that the radiation is the main parameter in the power behavior of the PV module and that it is technically feasible to use the PV module for the city of Natal - city located in the Brazilian northeast - under the climatic conditions of the analyzed time interval. The temperature influences negatively, while the wind speed influences positively the power of the PV module.*

Keywords: Photovoltaic Panel, Heat Transfer, Influencer Parameter, Solar Energy.