

Análise do comportamento da temperatura de um módulo fotovoltaico de silício policristalino operando sob as condições meteorológicas de Fortaleza-CE

Calil Nunes Souza (UFC) - calilnsouza@gmail.com

Bruna de Oliveira Busson (UFC) - bruna.busson@yahoo.com.br

Matheus Albuquerque Melo (UFC) - matheus.a.melo3@gmail.com

Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho (UFC) - clodoaldo@ufc.br

PAULO C. M. CARVALHO (UFC) - carvalho@dee.ufc.br

Resumo:

O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir da conversão da irradiação solar em células fotovoltaicas (FV). A temperatura de operação da célula FV é uma das propriedades físicas que se destacam por permitir a avaliação do desempenho do módulo FV, no qual a elevação da temperatura da célula FV acarreta na redução da geração de eletricidade. Devido às perdas na geração FV, em razão do aumento temperatura de operação de um módulo FV, e devido à temperatura de operação para módulos FV, que operam no Nordeste brasileiro (NE) ser superior à temperatura nas condições de teste, o presente artigo propõe um modelo de comportamento térmico para estimar a temperatura de operação de um módulo FV operando sob as condições meteorológicas da cidade de Fortaleza-CE. O modelo de previsão de temperatura de operação é desenvolvido a partir do balanço de energia em regime permanente aplicado ao módulo FV. A equação obtida é não linear e implícita. A solução dessa equação é feita com o auxílio de método numérico iterativo de otimização baseado no algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) implementado em planilha MS-Excel. A curva de temperatura de operação calculada do modelo é comparada à temperatura de operação de um módulo FV de 20 Wp operando na região NE. A maior diferença entre as temperaturas medida e estimada é de cerca de 3,0°C e o menor erro relativo entre as duas ocorre às 12:00 horas. O modelo desenvolvido mostra-se representativo e descreve adequadamente o comportamento das curvas de temperatura de operação com erro máximo de 15,8%.

Palavras-chave: *Módulo FV, Balanço de Energia, Temperatura de Operação*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos*

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO OPERANDO SOB AS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE FORTALEZA-CE

Calil Nunes Souza – calilnsouza@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

Bruna de Oliveira Busson – bruna.busson@yahoo.com.br

Universidade Federal do Ceará, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Matheus Albuquerque Melo – matheus.a.melo3@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho – clodoaldo@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

4.2 Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

Resumo. O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir da conversão da irradiação solar em células fotovoltaicas (FV). A temperatura de operação da célula FV é uma das propriedades físicas que se destacam por permitir a avaliação do desempenho do módulo FV, no qual a elevação da temperatura da célula FV acarreta na redução da geração de eletricidade. Devido às perdas na geração FV, em razão do aumento temperatura de operação de um módulo FV, e devido à temperatura de operação para módulos FV, que operam no Nordeste brasileiro (NE) ser superior à temperatura nas condições de teste, o presente artigo propõe um modelo de comportamento térmico para estimar a temperatura de operação de um módulo FV operando sob as condições meteorológicas da cidade de Fortaleza-CE. O modelo de previsão de temperatura de operação é desenvolvido a partir do balanço de energia em regime permanente aplicado ao módulo FV. A equação obtida é não linear e implícita. A solução dessa equação é feita com o auxílio de método numérico iterativo de otimização baseado no algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) implementado em planilha MS-Excel. A curva de temperatura de operação calculada do modelo é comparada à temperatura de operação de um módulo FV de 20 Wp operando na região NE. A maior diferença entre as temperaturas medida e estimada é de cerca de 3,0°C e o menor erro relativo entre as duas ocorre às 12:00 horas. O modelo desenvolvido mostra-se representativo e descreve adequadamente o comportamento das curvas de temperatura de operação com erro máximo de 15,8%.

Palavras-chave: Módulo FV, Balanço de Energia, Temperatura de Operação.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial tem gerado um crescimento acelerado da demanda de energia elétrica em todo o mundo. Entretanto, esse consumo é atendido em sua maior parte por fontes de energia não renováveis. A sociedade está cada vez mais consciente dos impactos negativos advindos da poluição causada pelo uso de combustíveis fósseis e, em razão disso, busca um maior consumo de “energias limpas” para contribuir com a redução dos efeitos causados pela utilização do petróleo e outras matrizes energéticas que causam maior impacto ao meio ambiente (Souza e Aristone, 2016).

Dessa forma, fontes renováveis de energia aparecem atualmente como soluções sustentáveis, duradouras e capazes de resolver alguns impasses (Cantor, 2017). Dentre as fontes renováveis de energia, destaca-se a solar (Pinho e Galdino, 2014), tanto fotovoltaica (FV) como térmica. No entanto, em 2017, 64,9% da produção de eletricidade mundial proveio de fontes fósseis (IEA, 2018).

O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir da conversão da irradiação solar em células FV. Os níveis de irradiação solar no Brasil são maiores do que em países onde projetos para utilização dessa fonte já são amplamente difundidos, como Alemanha, França e Espanha (Nascimento, 2017). Mesmo com os diferentes climas do território brasileiro, a irradiação solar global horizontal total diária é razoavelmente uniforme no país. O Nordeste brasileiro (NE) apresenta um valor máximo médio diário de 6,25 kWh/m², sendo também a região com menor quantidade de sombreamento por nuvens no país (Pereira *et al.*, 2017).

Módulos FV convertem cerca de 10% - 20% da irradiação solar incidente. O restante é, em grande parte, acumulado na forma de calor, como representado na Fig. 1. Uma parte da irradiação solar também é refletida para o meio ambiente. A parte da energia incidente transformada em calor faz com que a temperatura da célula FV aumente (Huide *et al.*, 2017; Dimri *et al.*, 2017).

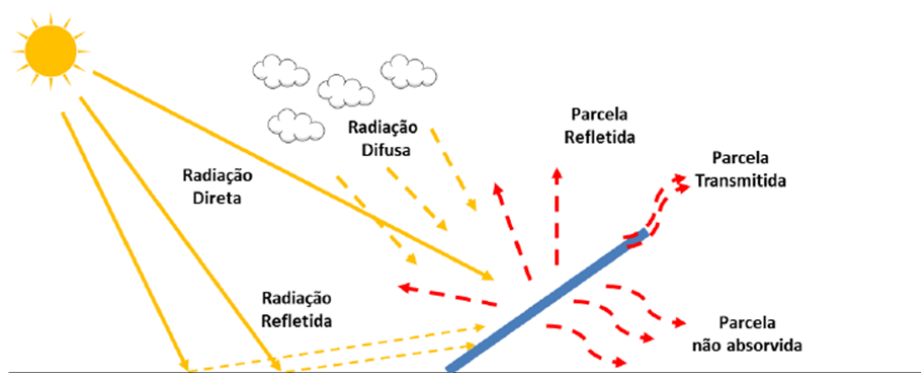


Figura 1 – Balanço energético simplificado em um módulo FV (Silva, 2017).

A temperatura de operação, que é definida como sendo a temperatura da célula FV, é uma das propriedades físicas que se destacam por permitir a avaliação do desempenho e da integridade das células FV (Cantor, 2017; Da Silva, 2017). A temperatura de operação pode ser determinada pelo balanço de energia, levando em consideração irradiação, potência elétrica e condições ambientais como temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade (Da Silva, 2017). Em termos operacionais, a medição da temperatura de operação não é algo prático de ser feita, pois a célula FV está disposta internamente a um módulo FV, composto pela célula FV e outros materiais estruturais dispostos em camadas. Entretanto, pode-se medir a temperatura da superfície inferior ou da superfície superior do módulo e, com um balanço de energia, determinar a temperatura de operação.

Os módulos FV encontrados comercialmente são testados em condições diferentes das condições de operação encontradas em regiões de clima quente. Como consequência das diferentes condições de uso e de testes, há um decréscimo na geração de eletricidade obtida comparado à geração nominal fornecida pelos fabricantes, devido à importância da temperatura de operação dos módulos FV e ao desempenho diferente apresentado pelos módulos em operação em boa parte do Brasil em relação às condições padrão de teste do fabricante.

O presente artigo propõe, então, um modelo de comportamento térmico, baseado no balanço de energia de um módulo FV operando sob as condições meteorológicas da cidade de Fortaleza, Ceará, para estimar a temperatura de operação do módulo FV. A validação do modelo proposto será feita por comparação entre a temperatura calculada e a temperatura de operação medida em ensaios experimentais. Por fim, para atestar a representatividade ao longo do dia baseada em um intervalo de tolerância do modelo proposto será analisado o desvio relativo entre essas temperaturas.

Também sob as condições meteorológicas de região de clima quente e úmido, Busson *et al.* (2018) analisa três modelos de comportamento térmico para previsão da temperatura de operação de módulos FV presentes na literatura, sendo eles os modelos de Ross (1976), Chenni *et al.* (2007) e Duffie e Beckman (2013). Os autores concluem que nenhum dos três métodos é suficientemente adequado para descrever o comportamento térmico de módulos FV instalados na região. Atestando a importância de um modelo de previsão da temperatura de operação que consiga representar o comportamento térmico de módulos FV operando em regiões de clima quente.

2. BALANÇO DE ENERGIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

As células FV são as responsáveis por converter irradiação solar em corrente contínua a partir de fótons colidindo na célula. As células FV são soldadas em tiras, geralmente com soldagem realizada com iluminação com lâmpadas halógenas ou radiação *laser*. Depois de soldadas, as células FV são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo FV (Pinho e Galdino, 2014). Em termos estruturais, da face superior que recebe a irradiação solar para a camada inferior, o módulo FV é geralmente constituído por uma camada de vidro; um primeiro filme encapsulante conhecido como EVA, acetato-vinilo de etileno (que deriva do inglês, Ethylene Vinyl Acetat); uma camada de silício, que converte fótons em corrente elétrica; um segundo filme de encapsulante EVA; uma camada de *Backsheet*, sendo o *Tedlar®* uma versão comercial utilizada (Portal Solar, 2019). A Fig. 2 mostra a estrutura básica de um módulo FV.

Os módulos FV encontrados comercialmente são testados em condições diferentes das condições de operação encontradas em certas regiões do Brasil, como a região NE. Os módulos são testados em condições padronizadas de teste STC (*Standard Test Conditions*) e NOCT (*Nominal Operation Cell Temperature*), ambas definidas por normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*) (Verlinden e Sark, 2017). As STC consideram a irradiância padrão igual a 1.000W/m^2 e a temperatura do módulo FV de 25°C . Estas condições são produzidas em laboratório, dentro de uma câmara climática que possui um sistema preciso de controle e medição, de iluminação e de temperatura. Todos os fabricantes de módulos FV realizam os testes nas mesmas condições, sendo possível assim comparar módulos de diversos fabricantes de acordo com os mesmos critérios (Villalva, 2012).

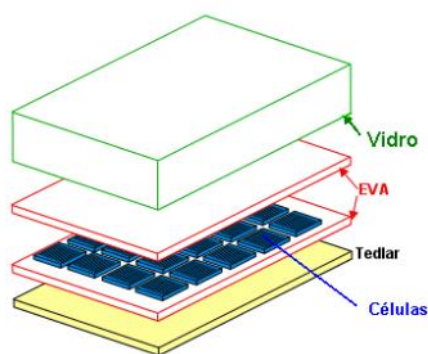


Figura 2 - Componentes básicos do módulo FV (Andrade, 2008).

A análise do comportamento térmico de um módulo FV operando sob as condições meteorológicas da região NE é realizada considerando:

- Um módulo FV instalado no telhado (forma convencional) com ângulo de inclinação nulo em relação a horizontal.
- Uma parcela da irradiação incidente é refletida para o ambiente.
- A irradiação absorvida pelo módulo FV é, em parte, convertida em energia elétrica.
- A superfície superior do módulo FV é aproximada como transparente, permitindo a passagem de toda irradiação incidente para as células FV.
- A energia interna acumulada na forma de calor é dissipada tanto pela superfície superior como pela inferior do módulo FV por radiação e convecção.
- As perdas por radiação devem-se à emissividade radiante tanto na superfície superior como na inferior.
- As perdas por convecção devem-se ao contato das superfícies superior e inferior com o ar em escoamento forçado.
- Balanço de energia em regime permanente.

O balanço de energia em regime permanente do módulo FV inclui o termo q_s que é a taxa total de calor dissipado (W) na superfície superior do módulo, o termo q_i que é a taxa total de calor dissipado (W) na superfície inferior e o termo W_{el} que é a potência elétrica (W) gerada pelo módulo FV, conforme mostrado na Fig. 3 é dado pela Eq. (1).

$$\alpha GA - q_s - q_i - W_{el} = 0 \quad (1)$$

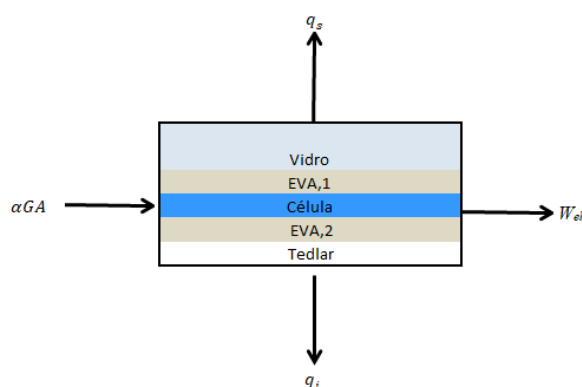


Figura 3 - Balanço de energia para o módulo FV.

A partir dos elementos construtivos do módulo FV, pode-se montar um circuito térmico (Fig. 4) para análise do balanço de energia no módulo. Para o balanço de energia foi considerado que as superfícies do vidro e do EVA, entre o vidro e a célula FV, são transparentes. Assim, a irradiação chega à célula FV onde uma porção é absorvida e outra porção é refletida ao ambiente externo ao módulo FV. Os componentes foram modelados como sendo paredes planas.

Define-se L_v como a espessura do vidro e k_v como a condutividade do vidro. Como $EVA,1$ é a camada de EVA entre a camada de vidro e a célula FV, $L_{eva,1}$ é a espessura do $EVA,1$, k_{eva} é a condutividade térmica do EVA. Como $EVA,2$ é a camada de EVA sob a célula FV, $L_{eva,2}$ é a espessura do $EVA,2$. A camada de *Tedlar* vem abaixo do $EVA,2$, sendo L_{ted} é a espessura da camada de *Tedlar* e k_{ted} é a sua condutividade térmica.

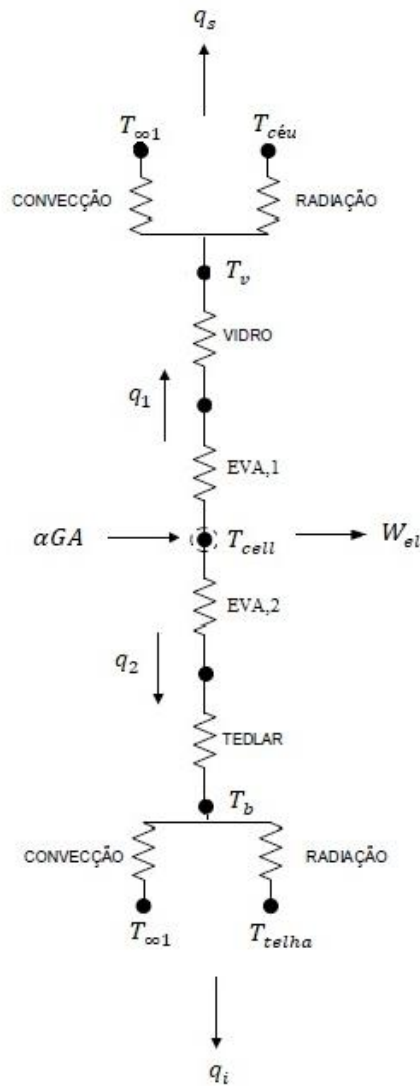


Figura 4 - Circuito térmico que representa o balanço de energia para o módulo FV convencional.

A expressão que representa q_s , segundo termo na Eq. (1), é uma combinação das perdas por convecção para o ar e por radiação para o meio da superfície superior:

$$q_s = h_v A (T_v - T_{\infty 1}) + F_{s-céu} \varepsilon_v \sigma A (T_v^4 - T_{céu}^4) \quad (2)$$

Onde h_v é o coeficiente convectivo entre o vidro e o ar (W/m^2K), $F_{s-céu}$ é o fator de forma entre a superfície superior e o céu (aproximado por 1), ε_v é a emissividade do vidro, T_v é a temperatura da superfície superior do vidro (K), T_a é a temperatura do ar (K) e $T_{céu}$ é a temperatura do céu (K).

De forma análoga, tem-se para q_i , segundo termo na Eq. (1), uma combinação das perdas por convecção para o ar e por radiação para as telhas:

$$q_i = h_b A (T_b - T_{\infty 1}) + F_{i-telha} \varepsilon_{ted} \sigma A (T_b^4 - T_{telha}^4) \quad (3)$$

Onde $F_{i-telha}$ é o fator de forma entre a superfície inferior e as telhas (igual a 1), sendo ε_{ted} a emissividade do Tedlar, h_b é o coeficiente convectivo entre o ar e a superfície inferior (W/m^2K), T_b é a temperatura da superfície inferior do Tedlar (K) e T_{telha} é a temperatura das telhas (K) que estão abaixo do módulo FV.

O calor líquido que sai da célula FV (q_1) e vai em direção ao vidro por condução. Da célula FV sai q_2 , que é o calor que vai para a superfície inferior do módulo FV por condução. O regime de transferência de calor é permanente, a troca de calor ocorre de forma unidimensional, ou seja, não há trocas consideráveis nas laterais do módulo FV. A camada de silício, devido a sua pequena espessura, está à mesma temperatura, T_{cell} .

Entre as temperaturas T_{cell} e T_v estão as resistências térmicas R_v e $R_{eva,1}$ em série. Assim, tem-se a condição para encontrar T_v em função de T_{cell} :

$$q_1 = \frac{T_{cell} - T_v}{R_v + R_{eva,1}} \quad (4)$$

Por substituição da Eq. (3) e (4) na relação $q_1 = q_s$:

$$h_v A (T_v - T_{\infty 1}) + F_{s-c\u00e9u} \varepsilon_v \sigma A (T_v^4 - T_{c\u00e9u}^4) = \frac{T_{cell} - T_v}{R_v + R_{eva,1}} \quad (5)$$

De modo an\u00e1logo a Eq (4), entre as temperaturas T_{cell} e T_b est\u00e3o as resist\u00eancias t\u00e9rmicas R_{ted} e $R_{eva,2}$ em s\u00e9rie. Assim, tem-se a condi\u00e7\u00e3o para encontrar-se T_b em fun\u00e7\u00e3o de T_{cell} , conforme $q_2 = q_i$:

$$h_b A (T_b - T_{\infty 1}) + F_{i-telha} \varepsilon_{ted} \sigma A (T_b^4 - T_{telha}^4) = \frac{T_{cell} - T_b}{R_{ted} + R_{eva,2}} \quad (6)$$

A pot\u00eancia gerada, \u00faltimo termo da Eq. (1), depende da rela\u00e7\u00e3o entre a irradia\u00e7\u00e3o \u00fatil capaz de produzir eletricidade e a efici\u00eancia do m\u00f3dulo FV. A efici\u00eancia de convers\u00e3o FV varia com a temperatura de opera\u00e7\u00e3o, proposta por Mohring *et al.* (2004):

$$W_{el} = \eta_{NOCT} [1 + C(T_{cell} - 25)] GA \quad (7)$$

Onde η_{NOCT} \u00e9 a efici\u00eancia do m\u00f3dulo FV sob as condi\u00e7\u00f5es de teste NOCT, C \u00e9 a constante de redu\u00e7\u00e3o da efici\u00eancia que, no caso de c\u00e9lulas de sil\u00edcio policristalino, vale $-0,5\%/^{\circ}C$ (Mohring *et al.*, 2004). Por fim, o balan\u00e7o de energia completo para o m\u00f3dulo, conforme Fig. 5 e Eq. (8), tem como \u00fanica vari\u00e1vel T_{cell} .

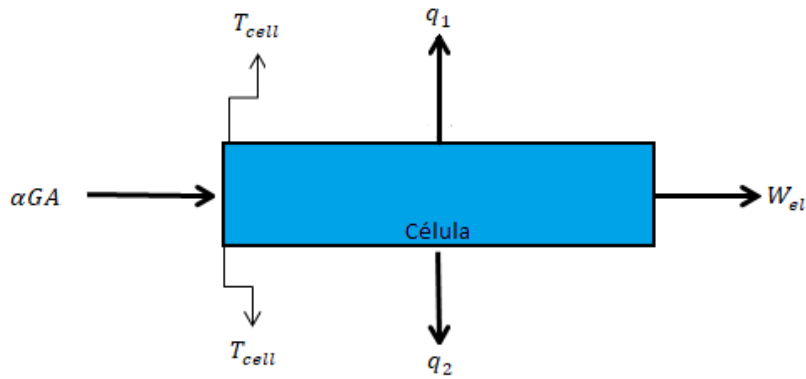


Figura 5 - Volume de controle considerando a c\u00e9lula FV.

$$(\alpha - \eta_{NOCT}(1 + C(T_{cell} - 25)))GA - h_v A (T_v - T_{\infty 1}) - F_{s-c\u00e9u} \varepsilon_v \sigma A (T_v^4 - T_{c\u00e9u}^4) - h_b A (T_b - T_{\infty 1}) - F_{i-telha} \varepsilon_{ted} \sigma A (T_b^4 - T_{telha}^4) = 0 \quad (8)$$

A Eq. (8) apresenta tr\u00eas vari\u00e1veis (T_{cell} , T_v e T_b), mas tanto T_v e T_b s\u00e3o fun\u00e7\u00e3o de T_{cell} . Ent\u00e3o, ao final o modelo apresenta uma equa\u00e7\u00e3o e uma vari\u00e1vel.

3. MATERIAIS E M\u00c9TODOS

A parte experimental foi realizada no Laborat\u00f3rio de Energias Alternativas da Universidade Federal do Cear\u00e1 (LEA/UFC) e a parte computacional no Laborat\u00f3rio de Efici\u00eancia Energ\u00e9tica no Condicionamento de Ar da UFC (LEECA/UFC). Na fase experimental, primeiramente, ocorre a montagem da bancada de testes, incluindo o m\u00f3dulo FV no telhado, o sensoriamento do m\u00f3dulo e das condi\u00e7\u00f5es ambientais locais. O sensoriamento do m\u00f3dulo, por sua vez, fornece dados que s\u00e3o utilizados na elabora\u00e7\u00e3o das planilhas de balan\u00e7o t\u00e9rmico do m\u00f3dulo FV para posterior compara\u00e7\u00e3o dos resultados calculados com as medi\u00e7\u00f5es para valida\u00e7\u00e3o do modelo proposto.

A Tab. 1 apresenta a lista com os sensores utilizados nos experimentos e as medi\u00e7\u00f5es realizadas por eles. Os dados meteorol\u00f3gicos como irradia\u00e7\u00e3o e temperatura ambiente s\u00e3o colhidos para avalia\u00e7\u00e3o das condi\u00e7\u00f5es meteorol\u00f3gicas que influenciam no comportamento t\u00e9rmico e, conseq\u00fcentemente, no desempenho do m\u00f3dulo FV. Al\u00e9m das informa\u00e7\u00f5es meteorol\u00f3gicas, tamb\u00e9m s\u00e3o monitorados os valores de temperatura de opera\u00e7\u00e3o do m\u00f3dulo FV.

As curvas de temperatura buscam analisar a distribui\u00e7\u00e3o de temperatura ao longo do dia do m\u00f3dulo FV sobre o telhado, sendo o m\u00f3dulo instalado sobre o telhado com \u00e2ngulo de inclina\u00e7\u00e3o nulo em rela\u00e7\u00e3o a horizontal. O m\u00f3dulo FV utilizado \u00e9 de sil\u00edcio policristalino sem moldura, com pot\u00eancia el\u00e9trica nominal de 20 Wp, modelo KS20T, conforme a Fig. 6.

Tabela 1 – Sensores utilizados nos experimentos.

SENSOR	PARÂMETRO MEDIDO
PT100	Temperatura do módulo FV
	Temperatura da água
	Temperatura ambiente
Piranômetro	Irradiância incidente
Anemômetro	Velocidade do vento local
Sensor de corrente	Corrente e tensão



Figura 6 – Módulo FV sobre o telhado.

Nos testes realizados no LEA/UFC, os sensores PT100 foram conectados a transmissores de temperatura modelo TxRail com saída programável de 4 – 20 Ma. Os transmissores de temperatura estão conectados ao sistema supervisorio composto por controladores lógicos programáveis (CLP) que envia os dados para o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) *TeamViewer* presente no computador do LEA/UFC (Alencar Filho, 2018).

O balanço de energia apresentado na Seção 2 é implementado em planilha eletrônica de cálculo do *software Excel* juntamente com o uso da biblioteca de propriedades termodinâmicas *CoolProp* (CoolProp, 2020). O componente *solver* do *Excel* permite resolver problemas de otimização no qual o valor ideal de uma célula da planilha específica deve ser calculado com base nas restrições previstas em outras células. O *solver* do *Excel* usa o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) para resolver problemas de otimização.

A Eq. (8) representativa do modelo de temperatura de operação é não linear e as incógnitas são implícitas. Portanto, a solução da equação requer o procedimento numérico iterativo realizado pelo *solver* para encontrar a solução. A função objetivo do *solver* é a Eq. (8). Para simular a temperatura do módulo FV através das planilhas apenas T_{cell} é a incógnita que varia durante o processo de iteração. Para o procedimento iterativo alcançar uma solução definiu-se um valor de tolerância residual igual ou menor do que 10^{-6} .

As espessuras das camadas estruturais do módulo FV e os valores da emissividade e condutividade térmica estão definidos na Tab. 2.

Tabela 2 – Valores de espessuras, emissividades e condutividades térmicas para as equações (Incropera *et al.*, 2008; Lee e Tay, 2011; Ruschel *et al.*, 2015; Guarracino *et al.*, 2016).

MATERIAL	ESPESSURA	EMISSIVIDADE	CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Vidro	$L_v = 3,2 \text{ mm}$	0,95	$k_v = 1,80 \text{ W/Mk}$
EVA,1	$L_{EVA,1} = 1,0 \text{ mm}$		$k_{EVA,1} = 0,35 \text{ W/Mk}$
EVA,2	$L_{EVA,2} = 0,5 \text{ mm}$		$k_{EVA,2} = 0,35 \text{ W/Mk}$
Tedlar	$L_{ted} = 0,2 \text{ mm}$	0,90	$k_{ted} = 0,24 \text{ W/Mk}$

Após as simulações feitas os resultados fornecidos pelas planilhas são comparados às medições obtidas. Assim, é possível obter a validação do balanço de energia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de temperatura e irradiação solar diária utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de aferições contínuas a cada minuto no período de fevereiro a junho de 2019. A faixa horária de análise utilizada está entre 6:00 e 18:00 horas, pois antes de 6:00 horas e depois de 18:00 horas não há irradiação solar incidente.

As medições de irradiação do período foram divididas segundo três níveis de irradiação diária. Dias com irradiação entre 2,5 e 5,0 kWh/m² são classificados como de moderada irradiação; dias com irradiação maior do que 5,0

kWh/m² são classificados como de alta irradiação. A Fig. 7 apresenta as curvas da irradiação solar diária para as faixas de irradiação moderada e alta.

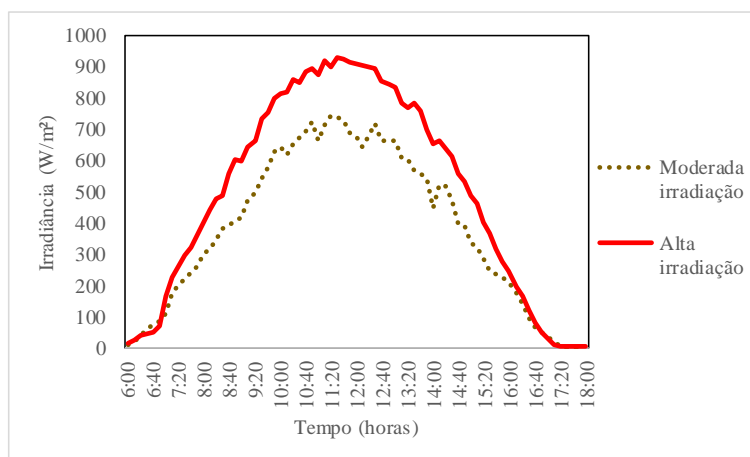


Figura 7 - Curvas de irradiação para os níveis definidos.

A temperatura no módulo FV é tomada no centro da superfície inferior e refere-se à temperatura T_b da Eq. (6). As temperaturas mais altas, tanto nas temperaturas medidas quanto nas estimadas são medidas ao meio-dia, horário de maior irradiação.

O módulo FV operava praticamente de forma isotérmica, pois as diferenças entre as temperaturas do vidro, da célula FV e do *Tedlar* (superfície posterior do módulo FV) diferiam pouco entre si, com diferenças relativas entre as temperaturas da superfície superior e da célula FV de até 1,5%, com a maior diferença observada entre 12:00 e 13:00 horas. Já a temperatura no vidro (superfície superior do módulo FV) é menor devido a três fatores: o coeficiente convectivo entre o ar e o vidro é maior que o coeficiente convectivo entre o ar e a superfície posterior; a emissividade do vidro é maior que a emissividade da superfície posterior; a resistência térmica entre o vidro e a célula FV é maior que a resistência térmica entre a célula FV e a superfície posterior.

De posse da temperatura de operação medida pelo PT100, comparou-se a temperatura medida com a temperatura fornecida pelo modelo proposto. Para o módulo FV, a Fig. 8 mostra as curvas das medições de temperatura e a curva da simulação para os dias de moderada irradiação. A Fig. 9, de modo análogo, mostra as curvas das medições de temperatura e a curva da simulação para os dias de alta irradiação.

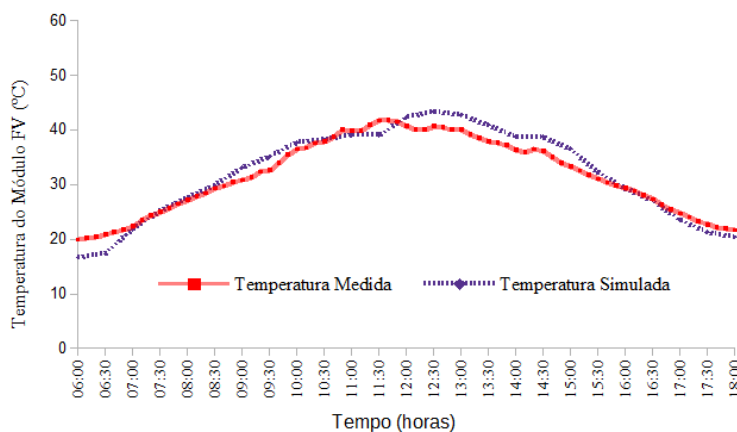


Figura 8 - Comparação entre as temperaturas medida e simulada para o módulo FV nos dias de moderada irradiação.

Percebeu-se das Fig. 8 e 9 que o modelo proposto conseguiu prever a temperatura de operação, tanto para os dias com média irradiação quanto de alta irradiação. Entre 7:00 e 18:00 horas os erros relativos entre as temperaturas medida e calculada foram menores que 10%. Ou seja, dentro do intervalo de tolerância de 10% o modelo consegue descrever satisfatoriamente o comportamento térmico de um módulo FV operando em regiões de clima quente.

Nos dias com moderada irradiação, a maior diferença entre as temperaturas medida e simulada foi de 3,3°C às 6:00 horas. O menor erro relativo entre essas duas temperaturas ocorreu às 16:00 horas e foi de 0,1%. O maior erro entre as temperaturas medida e simulada para os dias com alta irradiação foi de 3,1°C às 6:00 horas com erro relativo de 15,8%. Às 12:00 horas, o modelo forneceu uma temperatura de operação com erro relativo de apenas 0,1% em relação à temperatura medida.

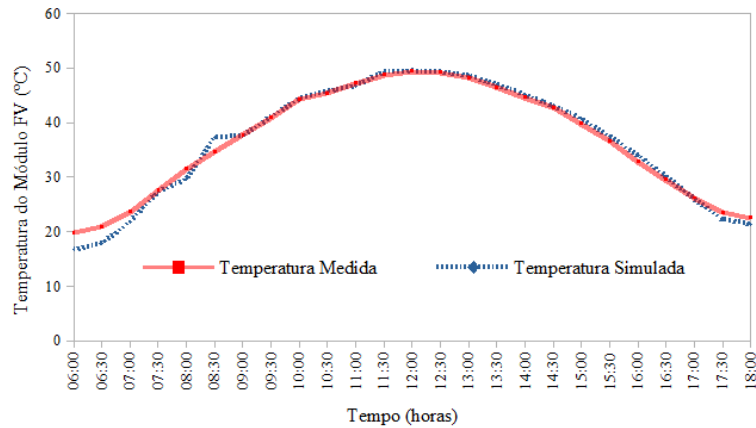


Figura 9 - Comparação entre as temperaturas medida e simulada para o módulo FV nos dias de alta irradiação.

Os dias de moderada irradiação eram caracterizados por sombreamento momentâneo do módulo FV. Para esses momentos de sombreamento o valor da irradiância tinha grandes variações e, devido ao modelo de balanço de energia em regime permanente (não levando em consideração a inércia térmica do módulo FV), os valores da simulação foram mais distantes dos valores medidos no experimento, conforme representado na Fig 8. Já para os dias de alta irradiação, com poucos momentos do dia com sombreamento e com valores de irradiância variando lentamente ao longo do dia, o modelo em regime permanente teve resultados mais próximos dos valores medidos, conforme se observa na Fig 9.

No início e no fim do dia, a Eq. (8) teve seu termo de entrada de energia minimizado e a solução encontrada pelo *solver* forneceu um valor menor de temperatura calculada. Mesmo assim, o comportamento da curva de temperatura fornecida pelo modelo segue o comportamento da curva de temperatura de operação medida.

Os três modelos de predição de temperatura de operação avaliados por Busson *et al.* (2018) para módulos FV operando em região de clima quente e úmido apresentavam uma diferença de até 18,4°C entre as temperaturas calculada e medida. Enquanto o modelo proposto no presente artigo apresenta uma diferença máxima entre as temperaturas calculada e medida de 3,3°C. Mas o modelo de Duffie e Beckman (2013) avaliado por Busson *et al.* (2018) foi o que descreveu de forma mais próxima o comportamento térmico do módulo FV e, mesmo assim, apresentou uma diferença máxima entre as temperaturas medida e estimada de 15,7°C, enquanto do modelo proposto foi de cerca de 3,0°C.

5. CONCLUSÕES

As temperaturas de operação se distanciam das temperaturas de teste (NOCT e STC) dos módulos FV, principalmente sob as condições meteorológicas de uma região de clima quente. Por essa temperatura de operação ter relação direta com a geração de eletricidade e provocar efeito adverso nesta, é importante definir o comportamento térmico de um módulo FV que opera em condições diferentes daquelas encontradas nos testes padrão.

O presente artigo propôs um modelo de comportamento térmico para previsão da temperatura de operação de um módulo FV instalado em telhado sob as condições meteorológicas de Fortaleza. A equação de descrição do modelo é não linear e implícita e sua solução foi alcançada pela utilização do *solver* do *Excel*. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com as curvas de temperatura medida de um módulo FV de 20 Wp instalado em telhado com inclinação nula.

A comparação entre as temperaturas medida e estimada mostrou que o balanço térmico implementado conseguiu prever adequadamente o comportamento da temperatura de operação do módulo FV. Em dias com irradiação entre 2,5 kWh/m² e 5,0 kWh/m², a maior diferença entre as temperaturas medida e calculada foi de 3,3°C e o menor erro relativo foi de 0,1%. Já nos dias com irradiação maior do que 5,0 kWh/m², o maior erro entre as temperaturas medida e calculada foi de 3,1°C e o menor erro relativo foi de apenas 0,1%.

Os resultados obtidos com o modelo foram condizentes com o comportamento térmico medido do módulo FV no telhado, haja vista que tanto descreveu as curvas de temperatura adequadamente como apresentou um erro máximo entre as temperaturas medida e estimada de cerca de 3,0°C. Assim, mostrou-se mais representativo do comportamento térmico de um módulo FV operando sob as condições meteorológicas da região NE brasileira do que outros modelos presentes na literatura.

Agradecimentos

Agradecemos à Capes pela bolsa de estudos de mestrado da segunda autora. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa 2 para o quinto autor. Agradecemos também ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

- Alencar Filho, A. A. R., 2018. Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFC, Fortaleza.
- Andrade, A. C., 2008. Análise e Simulação de Temperaturas em Módulos Fotovoltaicos, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Busson, B. O., Dias, P. H. F., Dupont, I. M., Campos, P. H. M., Carvalho, P. C. M., Barroso, A. Q., 2018. Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o semiárido brasileiro, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Cantor, G. A. R., 2017. Influência dos Fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical, Dissertação de Mestrado, CEAR, UFPB, João Pessoa.
- Chenni R., M. Makhlof, T. Kerbache, A. Bouzid, 2007. A detailed modeling method for photovoltaic cells, Energy, vol. 32, pp. 1724-1730.
- CoolProp. Disponível em: <http://www.coolprop.org/>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- Da Silva, J. S., 2016. Análise da Influência da Temperatura na Geração de Energia Utilizando Painéis Fotovoltaicos Monocristalinos e Policristalinos, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete.
- Dimri, N., Tiwari, A., Tiwari, G. N., 2017. Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector, Energy Conversion and Management, vol. 146, pp. 68–77.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, Editora Wiley.
- Guarracino, I., Mellor, A., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N., 2016. Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors, Applied Thermal Engineering, vol. 101, pp. 778–795.
- Huide, F., Xuxin, Z., Lei, M., Tao, Z., Qixing, W., Hongyuan, S., 2017. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems, Energy Conversion and Management, vol. 140, n. 2017, pp. 1–13.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2008. Fundamentos de transferência de calor e massa, LTC.
- International Energy Agency – IEA, 2018. Key World Energy Statistics 2016, IEA.
- Mohring, H. D., Stellbogen, D., Schäffler, R., Oelting, S., Gegenwart, R., Kontinen, P., Carlsson, T., Cendagorta, M., Hermann, W., 2004. Outdoor performance of polycrystalline thin film PV modules in different European climates, Proceedings of 19th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris.
- Lee, Y., Tay, A., 2012. Finite Element Thermal Analysis of a Photovoltaic Module, International Conference on Materials for Advanced Technologies 2011, Energy Procedia, vol. 15, pp. 413-420.
- Nascimento, R. L., 2017. Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas, Câmara dos Deputados.
- Pereira, Ê. B., Martins, F. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rütther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2a Edição, INPE. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html>. Acesso em: 30 mai. 2018.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, CEPEL- CRESESB.
- Portal Solar. Passo a Passo da Fabricação do Pannel Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-pannel-solar.html>. Acesso em: 18 mai. 2019.
- Ross, R.G., 1976. Interface design considerations for terrestrial solar cell modules, Proceedings of 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge.
- Ruschel, C. S., Gasparin, F. P., Krenzinger, A., 2015. Determinação da Capacidade Térmica de Módulos Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias, Revista Brasileira de Energia Solar, vol. 6, n. 2, pp.112-121.
- Silva, B. P. A., 2017. Metodologia para a Determinação de Temperatura em Painéis Fotovoltaicos por Meio da Termográfica Quantitativa, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.
- Souza, A., Aristone, F., 2016. Estudo da Eficiência Energética de Células Fotovoltaicas em Função da Radiação Solar no Centro Oeste Brasileiro, Revista InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade.
- Verlinden, P., Sark, W., 2017. Photovoltaic Solar Energy, John Wiley & Sons.
- Villalva, M. G., 2012. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações, Érica.

ANALYSIS OF THE TEMPERATURE BEHAVIOR OF A MODULE PHOTOVOLTAIC OF POLYCRYSTALLINE SILICON OPERATING UNDER WEATHER CONDITIONS OF FORTALEZA-CE

Abstract. Brazil has great potential for generating electricity from converting solar radiation into photovoltaic cells (PV). The operating temperature of the PV cell is one of the physical properties that stand out for allowing the evaluation of the performance of the PV module, in which the increase in the temperature of the PV cell causes a reduction in electricity generation. Due to the losses in the PV generation, due to the increased operating temperature of a PV module, and due to the operating temperature for PV modules, which operate in Northeast Brazil (NE) being higher than the temperature under the test conditions, this article proposes a thermal behavior model to estimate the operating temperature of a PV module operating under the meteorological conditions of the city of Fortaleza-CE. The

operating temperature prediction model is developed from the steady-state energy balance applied to the PV module. The equation obtained is non-linear and implicit. The solution of this equation is made with the aid of an iterative numerical optimization method based on the Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm implemented in an MS-Excel spreadsheet. The model's calculated operating temperature curve is compared to the operating temperature of a 20 Wp PV module operating in the NE region. The biggest difference between the measured and estimated temperatures is about 3.0 ° C and the smallest relative error between the two occurs at 12:00 pm. The developed model is representative and adequately describes the behavior of the operating temperature curves with a maximum error of 15.8%.

Key words: *PV Module, Energy Balance, Operating Temperature*