

VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

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

Pedro Henrique Fonteles Dias – pedrohfdias18@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Ivonne Montero Dupont – ivonne.mdupont@gmail.com

Pedro Hassan Martins Campos – p.hassan@hotmail.com

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

Edylla Andressa Queiroz Barroso – edylla_andressa@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos (FV) compromete o desempenho, pois quanto maior esta temperatura menor a tensão de circuito aberto e menor a potência máxima da célula. O objetivo do presente artigo é avaliar a adequação das equações desenvolvidas por Duffie e Beckman (2013), Ross (1976) e Chenni et al. (2007) para descrever o comportamento térmico de células FV nas condições climáticas do semiárido brasileiro. Os parâmetros utilizados nas três metodologias são captados pelo sistema de aquisição de dados (Sistema de Monitoramento Online - REMS) que realiza medições por meio de sensores a cada minuto. Os gráficos são construídos com base nas medições feitas e nas equações propostas, para as quinzenas de Agosto e Setembro de 2017. A visualização das curvas de temperatura de operação do painel FV mostram uma diferença acentuada entre a temperatura de operação real e a estimada pelos métodos em estudo, principalmente, nos horários de maior incidência de irradiação e temperatura ambiente entre 10:00 e 14:00 horas. Dentro da limitação de nossos resultados e para este caso, apesar de nenhum dos três métodos analisados ser adequado para a o diagnóstico da temperatura, percebe-se que o comportamento térmico é melhor descrito por Duffie e Beckman (2013). Este método apresenta menor diferença média (aproximadamente 13%) e menor erro máximo em Agosto (9,2°C) entre as temperaturas de operação estimada e medida dentre as metodologias investigadas.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Comportamento térmico, Temperatura de operação

1. INTRODUÇÃO

Apesar das diferenças climáticas e ambientais do território brasileiro, a irradiação solar global é razoavelmente uniforme, apresentando um valor máximo diário de 7 kWh/m² no clima semiárido da região Nordeste, onde há a menor média anual de cobertura de nuvens do país (Martins et al., 2008; Pereira et al., 2006), apresentando grande potencial produtivo de geração fotovoltaica (FV). A fonte solar tem grandes possibilidades de crescimento no mercado de energia elétrica, principalmente, após o advento da Resolução Normativa N° 482/2012 alterada pela N° 687/2015 que estabelece as condições gerais para uso de micro e minigeração distribuída (ANEEL, 2012). Porém, o conjunto de critérios para medições, cálculo e operação do sistema de compensação limita o uso dos créditos gerados (Pinto et al., 2016). Contudo, as altas temperaturas que as placas FV podem alcançar, muito por influência da temperatura ambiente, que no Nordeste tem uma média elevada, podem comprometer o desempenho desta geração.

A temperatura de operação de módulos FV é um dos parâmetros mais importantes na avaliação da performance a longo prazo de um painel (Jackrani et al., 2011). Os típicos valores máximos de eficiência são alcançados entre 14% e 17% no caso de células solares de silício monocristalino (Popovici et al., 2015). A temperatura de operação é determinada por um balanço de energia, em que a energia solar absorvida é convertida em energia elétrica e energia térmica que deve ser dissipada por uma combinação de mecanismos de transferência de calor (Pinho e Galdino, 2014). Para maximizar a saída elétrica, o módulo FV deve estar em temperaturas de operação mais baixas sob certas condições de irradiação solar incidente, temperatura do ambiente e velocidade do vento (Tripanagnostopoulos, 2002). Acima de 25°C, cada grau de elevação na temperatura reduz a eficiência, em média, 0,45% (Popovici et al., 2015).

O aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento na temperatura da célula. Conseqüentemente, a curva de potência é deslocada para a esquerda (Pinho e Galdino, 2014; Duffie e Beckman, 2013). A relação entre a potência máxima e a tensão de saída é avaliada mantendo-se a irradiância solar e a temperatura do módulo constantes. Se um dos fatores muda, todas as outras características mudam. Em suma, a potência máxima da célula diminui com o aumento da temperatura (Moharram et al., 2013).

A avaliação da operação e do design de sistemas FV deve ser baseada na relação tensão-corrente das células sob vários níveis de irradiação e temperatura da célula (Duffie e Beckman, 2013). As células FV operam em algum ponto da Curva I-V (ou curva característica), que mostra a relação da corrente em função da tensão no dispositivo (Duffie e Beckman, 2013; Pinho e Galdino, 2014). O efeito da temperatura na característica I-V da carga de um módulo pode ser

visualizado na Fig. 1, em que o aumento da temperatura conduz à redução da tensão de circuito-aberto e leve aumento da corrente de curto-circuito (Duffie e Beckman, 2013), para um mesmo nível de irradiância.

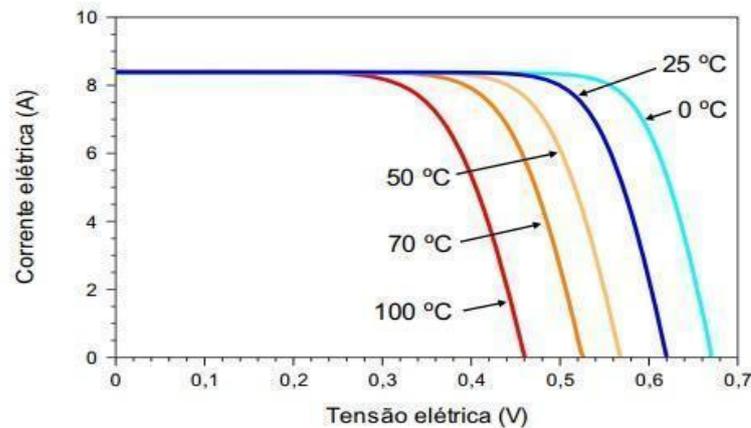


Figura 1 - Influência da temperatura da célula FV na curva I-V para uma irradiância de 1.000 W/m² (Pinho e Galdino, 2014).

1.1 Modelos para predição de temperatura do módulo FV

Existem duas abordagens de classificação de modelos para predição de temperatura. A primeira é o regime permanente em que a intensidade da irradiação solar incidente e outros parâmetros não variam no tempo. Além disso, a taxa de transferência de calor do módulo FV para o ambiente é permanente e a temperatura em cada ponto do módulo é constante. O balanço de energia que conduz à determinação da temperatura de operação da célula FV leva em consideração as propriedades físicas e térmicas, os dados solarimétricos e do clima e o coeficiente de transferência de calor devido ao vento (Jackrani, *et al.*, 2011; Skoplaki e Palyvos, 2008). A segunda, o regime transiente, mostra parâmetros que afetam a temperatura do módulo dependentes do tempo. É também uma abordagem baseada no balanço de energia (Jackrani, *et al.*, 2011).

Outra abordagem comum é a divisão em equações implícitas e explícitas que serve para expressar o efeito da temperatura de operação na eficiência dos painéis existentes. As correlações explícitas dão a temperatura de operação da célula (T_C em °C) diretamente, enquanto que as implícitas envolvem variáveis que dependem de T_C . Essas últimas são adequadas, principalmente, para situações em que os módulos são montados em posição livre. Sendo assim, deve ser evitado o uso em BIPV (*building-integrated photovoltaics* ou sistema fotovoltaico integrado a edificações), pois os lados do módulo estão sujeitos a condições ambientais um pouco diferentes (Skoplaki e Palyvos, 2008).

Quando os mecanismos de transferência de calor, como radiação e convecção, afetam ambas as faces superior e inferior do módulo, em instalações típicas, medidas são tomadas para facilitar a remoção do calor rejeitado de modo que o módulo possa operar da forma mais eficiente possível (Skoplaki e Palyvos, 2008). É difícil determinar com exatidão a temperatura da célula, porque as células são protegidas; assim, na maioria dos casos, a temperatura do lado posterior de um módulo FV é comumente medida e assumida como semelhante às temperaturas das junções. A diferença de temperatura entre o vidro frontal e o lado posterior chega a 0,4°C a 2,8°C (Coskun, 2017).

O balanço de energia de um módulo FV resfriado por perdas para as vizinhanças pode ser escrito como uma relação entre o produto efetivo transmitância-absortância ($\tau\alpha$), que quando multiplicado pela irradiação incidente produz a energia absorvida, a eficiência do módulo em converter irradiação em energia elétrica, o coeficiente de perda de calor e a diferença entre T_C e a temperatura ambiente (T_a em °C). O coeficiente de troca de calor (U_L em W/m²K) envolve perdas por convecção e radiação e, também, por condução através da estrutura de montagem (Duffie e Beckman, 2013).

O procedimento mais comum para determinar a temperatura da célula a partir da equação implícita consiste em usar a condição de referência de temperatura de operação nominal da célula (NOCT) cujos parâmetros são fornecidos por um Padrão de Referência do Ambiente (SRE - Standard Reference Environment) definido como o nível de irradiância total (G_T) de 800 W/m², T_a igual a 20 °C, velocidade do vento (V_W) de 1 m/s e carga elétrica nula (Coskun, 2017). Neste trabalho, o NOCT utilizado é fornecido pelo fabricante dos painéis considerando os testes a que foram submetidos. Além disso, a formulação da equação implícita, que envolve $\tau\alpha$ igual a 0,9 e aproxima U_L considerado constante por uma razão que envolve V_W , quando este for maior do que 1 m/s, é apresentada por Duffie e Beckman (2013) como:

$$T_C = T_a + \left[\left(\frac{G_T}{G_{T_{NOCT}}} \right) \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8 * V_W} \right) (T_{C_{NOCT}} - T_{a_{NOCT}}) (1 - \eta_m) \right] \quad (1)$$

onde η_m é a razão entre a eficiência de conversão do módulo (η_c) e $\tau\alpha$.

Modelos explícitos são baseados em simples expressões analíticas que são convenientes e necessárias em muitas aplicações práticas, que habilitam designers e engenheiros a determinarem os parâmetros-chave de uma célula ou módulo solar sem usar cálculos numéricos iterativos. A equação explícita mais simples é definida pela equação de Ross (1976):

$$T_c = T_a + kG_T \quad (2)$$

em que o parâmetro k conhecido como Coeficiente de Ross pode ter valores entre 0,02 e 0,04 Km^2/W ou ainda outros, dependendo do nível de integração e tamanho do *gap* de ar entre os módulos (Skoplaki e Palyvos, 2008). Apesar da variedade de valores, principalmente devido às variações na velocidade do vento, a aproximação linear para k igual a $0,03 (\text{W}/\text{m}^2)^{-1}\text{K}$, como uma razão da diferença entre a temperatura de módulos FV multicristalinos convencionais em Sistemas Solares Residenciais (SHS - *Solar Home Systems*), a temperatura ambiente e a irradiância global (Krauter, 2004). Existe também outra equação explícita proposta por Chenni et al. (2007) cuja modelagem é baseada nos dados fornecidos pelos fabricantes. O modelo utilizado é denominado de diodo único ou também de modelo de quatro parâmetros que leva em consideração a velocidade do vento, a temperatura ambiente e a irradiância solar (Jackrani, et al., 2011):

$$T_c = 0,943T_a + 0,028G_T - 1,528V_W + 4,3 \quad (3)$$

O objetivo do presente artigo é comparar os dados de temperatura de operação de um módulo FV colhidos na região do semiárido brasileiro com os modelos propostos na literatura para determinação dessa mesma temperatura a partir de alguns parâmetros. A coleta de dados foi realizada no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA - UFC).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados foram coletados por um sistema de aquisição e supervisão de dados aplicável a plantas de micro e minigeração FV instaladas no semiárido brasileiro. A análise do comportamento térmico e comparação com metodologias consagradas na literatura foram feitas com base na temperatura dos módulos FV. As medições de temperatura utilizadas são das duas últimas quinzenas dos meses de Agosto e Setembro de 2017, que são meses com baixo índice pluviométrico e altas médias de temperatura na região de estudo.

O sistema de monitoramento é composto basicamente por um microcontrolador PIC conectado a um Raspberry para medição de velocidade do vento, irradiância solar, temperaturas de operação do painel e ambiente, permitindo a visualização de gráficos. O sistema, que se comunica com servidor online para armazenamento dos dados, é autônomo e alimentado por painel FV. A visualização dos logs de monitoramento é feita a partir de um banco de dados estruturado MySQL, que pode ser consultado por qualquer dispositivo computacional, conectado à Internet (Dupont, 2016).

O sistema é programado para funcionar de forma descentralizada e distribuída, permitindo que múltiplos usuários e Sistemas Embarcados de Monitoramento Online (REMS) se comuniquem ao mesmo tempo pelo uso do mesmo servidor na nuvem. A Tab. 1 e a Fig. 2 mostram os sensores implantados na planta FV. O sensor de temperatura Pt-100 possui acurácia de $\pm 1^\circ\text{C}$ e é utilizado para medir a temperatura ambiente e de trabalho do painel FV. Este sensor é fixado no painel pelo uso de cola térmica para evitar bolhas de ar que isolem o contato entre as duas superfícies.

Tabela 1 – Componentes utilizados para aferição de dados

SENSORES	MEDIÇÃO
Divisor Resistivo por 4,6	Tensão
ACS712 - 5 A	Corrente
Pt-100	Temperatura ambiente e do painel FV
Piranômetro Hukseflux LP02	Irradiância solar

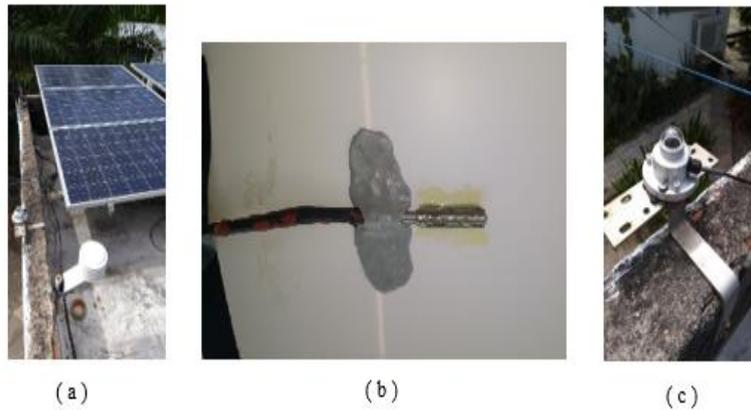


Figura 2 – Planta FV instalada no LEA-UFC composta por (a) Painel FV com sensor de temperatura ambiente, (b) sensor de temperatura instalado sob o painel e (c) piranômetro.

Os dados são coletados pelo REMS, alimentado por uma placa FV de 250 W de silício multicristalino modelo YL250P-29b, a cada 1 minuto e registrados por meio de uma média a cada período de 10 minutos durante 24 horas do dia. Porém, para o presente artigo interessam apenas os dados registrados entre 05:00 e 18:00 horas, período entre o nascer e pôr-do-sol. A análise dos dados é realizada por uma média de cada parâmetro nas quinzena dos respectivos meses. Este procedimento foi feito para todas as medições, exceto a velocidade média dos ventos nos meses de Agosto (4,0 m/s) e Setembro (1,3 m/s) de 2017, obtidas no site da FUNCEME.

A partir dos logs de monitoramento da planta FV são obtidos dados diários de irradiância solar horizontal, de temperatura ambiente e de operação do painel. A média desses dados para cada quinzena dos meses de Agosto e Setembro de 2017 permite a montagem dos gráficos que servirão de parâmetro para as curvas de temperatura de operação do painel segundo os três métodos em estudo neste trabalho.

As médias de temperatura de operação do painel são registradas em gráficos juntamente com as curvas obtidas da aplicação de cada uma das equações propostas na literatura. A curva obtida com as medidas feitas da temperatura do painel é confrontada com os resultados fornecidos de temperatura do painel dos modelos, sendo que as equações buscam a média de seus parâmetros nos outros dados coletados pelo REMS. A intenção é validar ou invalidar os modelos propostos na literatura e apresentados na seção Introdução de equações implícitas e explícitas. Nos gráficos os dados são representados a cada dez minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos períodos de ausência de irradiação apresentados na Fig. 3, até cerca de 06:30 horas e após 17:00 horas, a temperatura do painel é menor do que a temperatura ambiente (ver Fig. 4). Esse fenômeno conhecido como resfriamento por irradiação noturna ocorre porque diferentemente do que acontece durante o dia (ou período de constante irradiação), no período noturno, o céu está a uma temperatura menor que a superfície terrestre. Por consequência o calor é liberado na forma de comprimento de onda da superfície para o céu (Sikula *et al.*, 2015). Em vista disso, os dados durante os períodos de ausência de irradiação serão desconsiderados apesar de estarem presentes nos gráficos, pois fazem parte de uma outra discussão.

Os gráficos de comportamento da temperatura de operação do painel coletada pelo sensor de temperatura comparada com a previsão de comportamento dada pela Eq. (1) são apresentados na Fig. 5. Durante os horários de início da manhã e ao entardecer, antes de 07:00 horas e depois de 15:40 horas, T_c estimada pela Eq. (1) é superior a temperatura medida. Entre 07:00 e 15:40 horas acontece o inverso, pois a razão entre a irradiância em Fortaleza/CE neste período é, em média, superior à irradiância NOCT da placa solar, principalmente, nos períodos entre 10:00 e 14:00 horas.

Ao meio-dia em Agosto de 2017, o sensor de temperatura mediu 45,5°C e o método estimava 36,2°C, isto é, 25,7% abaixo da temperatura de operação real. Em Setembro, o comportamento da curva de temperaturas se mantém, registrando 37,5°C ao meio-dia, enquanto para o mesmo horário a temperatura medida estava 15,7°C acima. O maior problema dessa metodologia é o comportamento definido nos horários de maior incidência de irradiação e temperatura de operação.

Quando observados os gráficos de comportamento da temperatura de operação do módulo FV comparado com a previsão de comportamento dada pela Eq. (2), na Fig. 6, é possível observar que a metodologia de Ross (1976) superestima o comportamento térmico. Entre 10:00 e 14:00 horas, quando a curva de comportamento térmico atinge os valores máximos, a diferença entre a estimativa dada pela Eq. (2) e os valores medidos pelo sistema de aquisição de dados torna-se ainda mais acentuada. Por exemplo, no mês de Agosto ao meio-dia, as temperaturas são, respectivamente, 45,5°C (registrada) e 62,8°C (medida). A diferença de temperatura, portanto, passa a ser de 38%. No mês de Setembro, ao meio-dia a diferença entre T_c e a temperatura estimada foi de 9,3°C.

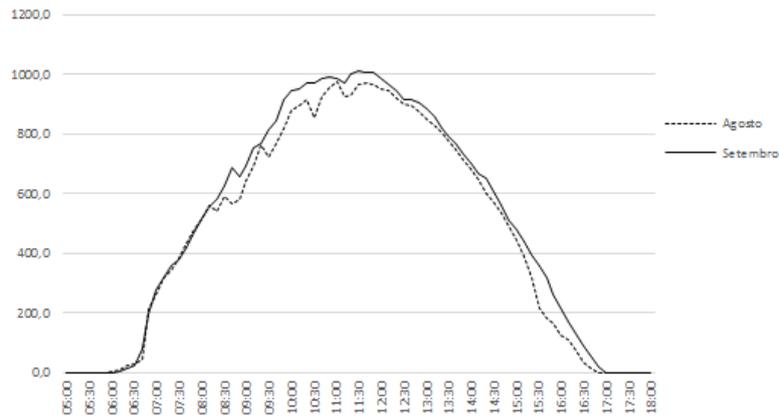


Figura 3 – Curvas de irradiância solar horizontal média nos meses de Agosto e Setembro de 2017

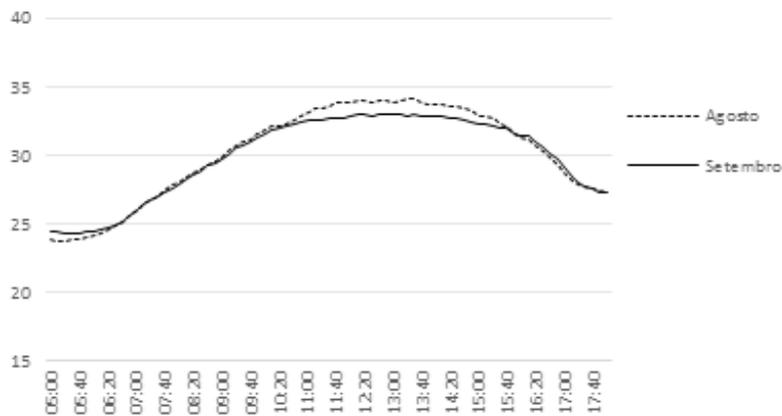
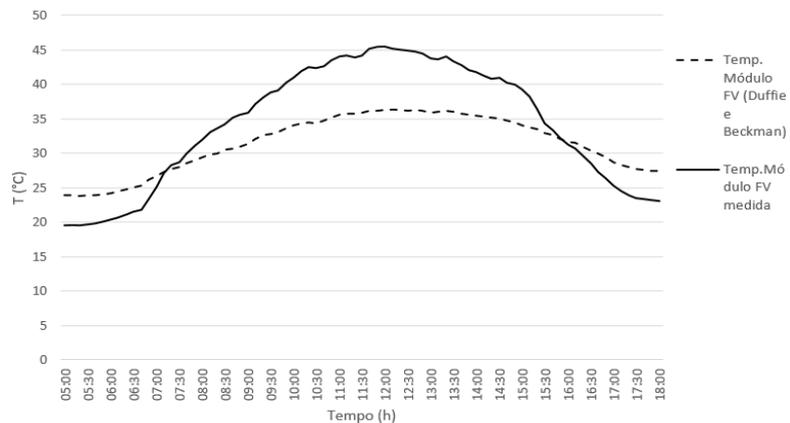


Figura 4 – Curvas de temperatura ambiente média nos meses de Agosto e Setembro de 2017

O modelo da Eq. (2) se mostrou pouco adequado para regiões de clima quente e com grande incidência de ventos que aumenta a perda de calor para a atmosfera. Isso é comprovado pelo fato do método de Ross (1976) no mês de Agosto, com velocidade média de ventos igual a 4 m/s, que influencia na redução da temperatura de operação, ter mantido altos valores de estimativa de T_C .

As curvas de comportamento térmico obtidas por meio da coleta de dados do sensor de temperatura e da metodologia desenvolvida por Chenni et. al. (2007) podem ser vistas na Fig. 7. Na curva (a) da Fig. 7 é possível notar uma boa aproximação entre a estimativa e a medição nos horários antes das 07:00 horas e depois das 15:00 horas. Contudo, as temperaturas de operação fornecidas pela Eq. (3) estão quase sempre acima de T_C medida.



(a)

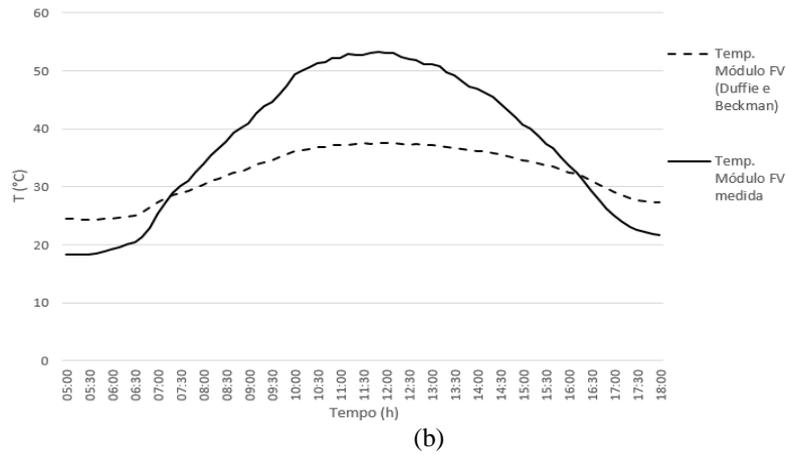


Figura 5 - Curvas de temperatura de operação do módulo FV segundo metodologia de Duffie e Beckman (2013) em (a) Agosto e (b) Setembro de 2017.

Na primeira quinzena às 12:00 horas, a metodologia de Chenni et. al. (2007) estima a temperatura de 56,8°C que está 11,3°C acima da temperatura real. Na segunda, o comportamento para esse horário se mantém, com a Eq. (3) mostrando uma temperatura de 60,9°C que é 7,8°C acima da temperatura real da célula. Essa diferença tão perceptível pode ser atribuída ao fato da velocidade do vento ter sido maior no mês de Agosto, causando maior perda de calor o que consequentemente reduz T_C .

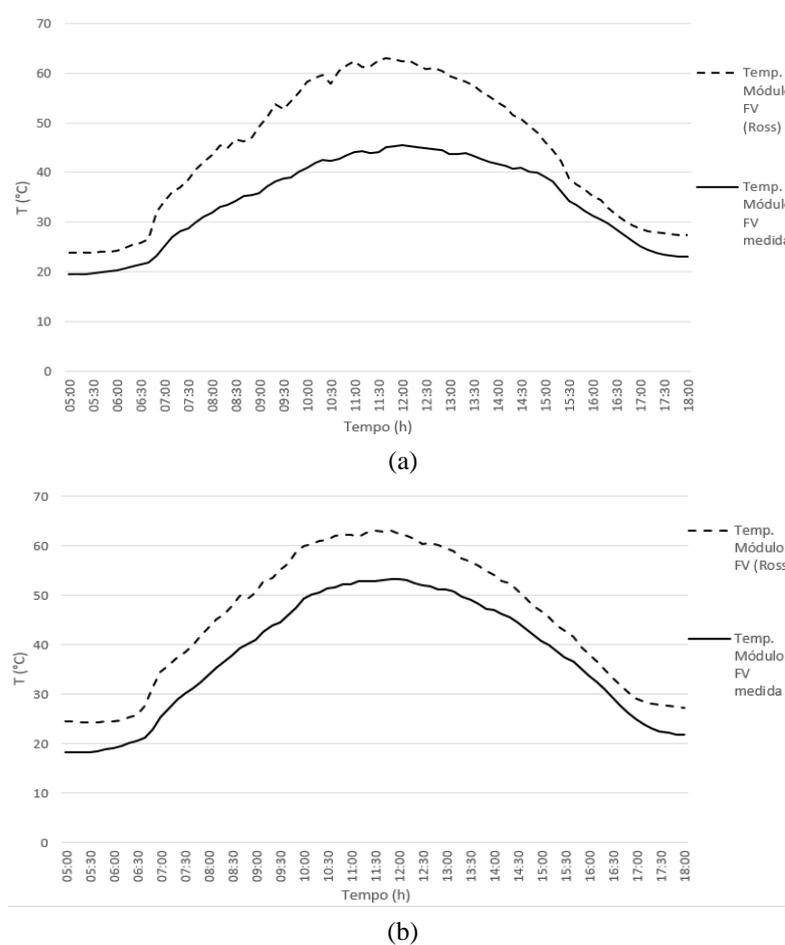


Figura 6 - Curvas de temperatura de operação do módulo FV segundo metodologia de Ross (1976) em (a) Agosto e (b) Setembro de 2017.

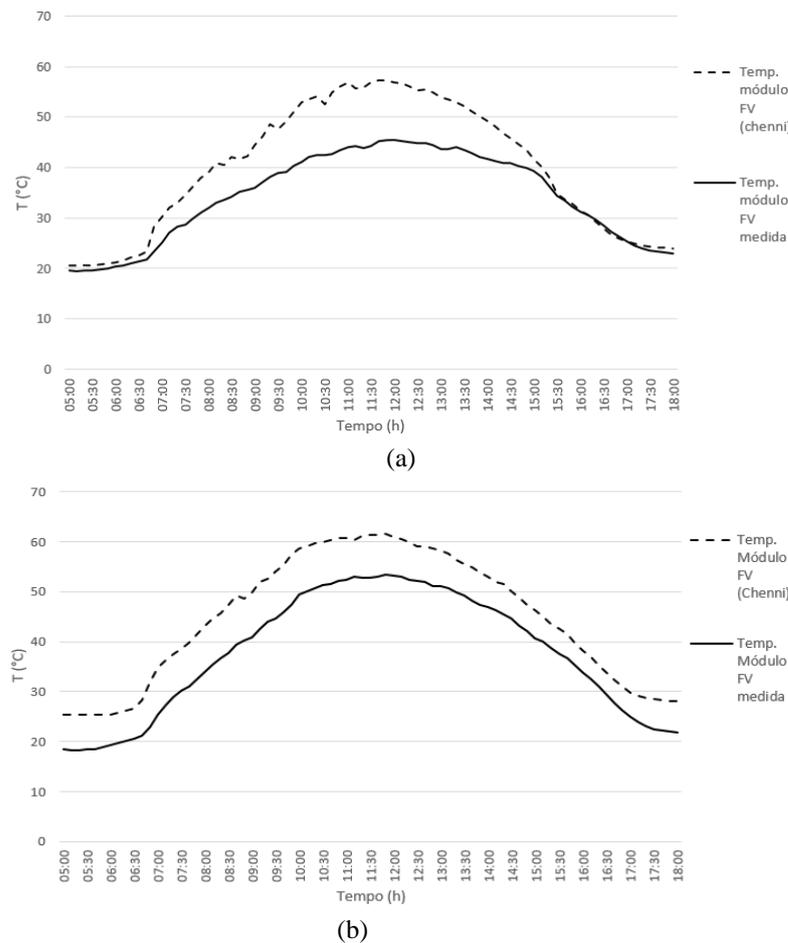


Figura 7 - Curvas de temperatura de operação do módulo FV segundo metodologia de Chenni et. al. (2007) em (a) Agosto e (b) Setembro de 2017.

Portanto, dentro da limitação dos resultados nenhum dos métodos consegue prever adequadamente o comportamento da temperatura de operação de um painel FV operando em regiões de clima quente e constância de ventos, como a região estudada. Para corroborar, a Tab. 2 mostra os valores de erro máximo e mínimo associados a cada uma das três estimativas apresentadas nas Eqs. (1) a (3) em relação às temperaturas de operação medidas e os seus respectivos horários. Os erros são medidos pela comparação da temperatura de operação estimada no que se refere à temperatura real.

A Tab. 2 mostra uma tendência dos métodos de se aproximarem da temperatura de operação real em horários mais próximos ao pôr-do-sol quando a temperatura ambiente e o nível de irradiância estão mais próximos aos valores definidos no NOCT do desenvolvimento das metodologias. Nos horários de elevado índice de irradiação (Fig. 3), as diferenças entre as temperaturas estimada e medida atingem seu pico nas três metodologias analisadas. As metodologias de Ross (1976) e Chenni et al. (2007) acabam superestimando T_c por levarem em consideração as altas irradiância e T_a , desconsiderando outros fatores que mantêm a temperatura real mais baixa do que a estimativa. Diferente dos outros dois métodos, Duffie e Beckman (2013) subestima a temperatura de operação.

Quando observado o comportamento ao longo do dia, as medições têm seu comportamento descrito de forma mais apropriada pela metodologia de Duffie e Beckman (2013), entre as três consideradas. Isso se deve ao fato de apresentar uma diferença média na estimativa em relação às medições de cerca de 13%, um valor menor do que o encontrado para Ross (1976) e Chenni et al. (2007), respectivamente, iguais a 31% e 18%. No entanto nenhuma das três metodologias do estudo consegue descrever adequadamente o comportamento térmico de um painel FV operando sob as condições climáticas da região do semiárido brasileiro visto que, em média, a irradiância é superior aquela definida pelo NOCT do painel solar, principalmente, nos períodos entre 10:00 e 14:00 horas.

Tabela 2 - Erros relativos às temperaturas medida e estimada pelas metodologias de Duffie e Beckman (2013), Ross (1976) e Chenni et al. (2007).

Mês	Metodologia	Erro mínimo (°C)	Horário de erro mín. (em horas)	Erro máximo (°C)	Horário de erro máx. (em horas)
Agosto	Duffie e Beckman (2013)	+2,1	07:50	-9,2	12:00
	Ross (1976)	+2,3	16:30	+18,4	11:30
	Chenni (2007)	+2,4	15:00	+12,8	11:30
Setembro	Duffie e Beckman (2013)	-2,2	15:50	-15,7	11:50
	Ross (1976)	+4,0	16:30	+11,3	09:50
	Chenni (2007)	+4,3	16:10	+10,0	09:50

4. CONCLUSÃO

Dentro das limitações dos resultados, nenhum dos três métodos (Duffie e Beckman (2013), Ross (1976) e Chenni et al. (2007)) é suficientemente adequado para descrever o comportamento térmico de módulos FV instalados na região do semiárido brasileiro, que possui grande potencial para instalação desse tipo de energia sustentável. Nos horários de elevado índice de irradiação, as diferenças entre a temperatura de operação real e a dada pelos métodos atingem seus maiores valores visto que, em média, a irradiação é superior aquela definida pelo NOCT do painel solar, principalmente, nos períodos entre 10:00 e 14:00 horas.

Porém, do ponto de vista da diferença entre a temperatura de operação medida e estimada, o método desenvolvido por Duffie e Beckman (2013), entre os três métodos analisados, é o que descreve de forma mais próxima o comportamento medido. Isso se deve ao fato de apresentar durante todo o período de operação do painel FV uma diferença nas medições de temperatura com cerca de 13% e erro máximo de 15,7°C. Se a observação for voltada para a existência de erros máximo e mínimo, a metodologia de Duffie e Beckman (2013) também torna-se mais apropriada entre as três analisadas. Essa metodologia, assim como a metodologia de Chenni et al. (2007), trata da relevância da perda de calor causada pela ação dos ventos constantes na região onde o painel está em operação. Os ventos representam a principal forma de troca de calor e contribuem para a redução de T_C e, conseqüentemente, para o aumento da potência máxima da célula, tornando esses modelos mais representativos.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012. Resolução Normativa N° 482.
- Coskun, C., Toygar, U., Sarpdag, O., Oktay, Z., 2017. Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: A Review, *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, pp. 31508-1.
- Chenni R., M. Makhlof, T. Kerbache e A. Bouzid, 2007. A detailed modeling method for photovoltaic cells, *Energy*, vol. 32, pp. 1724-1730.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Quarta edição. Editora Wiley. 910 p.
- Dupont, I. M., Pereira, R. I. S., Carvalho, P. C. M. de, Jucá, S. C. S., 2016. Sistema embarcado Linux aplicado ao monitoramento em nuvem de planta de microgeração fotovoltaica. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- FUNCEME. PCD - Plataforma de Coleta de Dados. Disponível em: <<http://www.funceme.br/app/pcd/mapa/sensor/vento/ce/2m?>>. Acesso em: 16 de Outubro de 2017.
- Jakhani, A. Q., Othman, A. K., Rigit, A. R. H., Samo, S. R., 2011. Comparison of Solar Photovoltaic Module Temperature Models, *World Applied Science Journal*, vol. 14, pp. 01-08.
- Krauter, S. C. W., 2004. Development of an integrated solar home system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 82, pp. 119-30.

- Martins, F. R., Pereira, E. B., Silva, S. A. B., Abreu, S. L., Colle, S., 2008. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment, Energy Policy, v. 36, pp. 2853-2864.
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., El-Sherif, H., 2013. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, Ain Shams Engineering Journal, vol. 4, pp. 869 - 877.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas fotovoltaicos. Grupo de Energia solar - GTES - CEPTEL - DTE - CRESESB. Rio de Janeiro. 529 páginas.
- Pinto, J. T. M., Amaral, K. J., Janissek, P. R., 2016. Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing, Solar Energy, vol. 133, pp. 73-84.
- Popovici, C. G., Hudisteanu, S. V., Mateescu, T. D., Chereches, N.-C., 2015. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks, Energy Procedia, vol. 85, pp. 425-432.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L. de, Rütther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Editora Swera. São José dos Campos: INPE. 60 páginas. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/pub/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 08 de Maio de 2017.
- Ross, R.G., 1976. Interface design considerations for terrestrial solar cell modules. Proceedings of 12th IEEE photovoltaic specialists conference, Baton Rouge, LA. pp. 801-6.
- Sikula, O., Vojtkuvková, P., Sima, J., Plasek, J., Gebauer, G., 2015. Hybrid roof panels for night cooling and solar energy utilization in buildings. Energy Procedia, vol. 74, pp. 177-183.
- Skoplaki, E., Palyvos, J. A., 2008. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, Renewable Energy, vol. 34, pp. 23-29.
- Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, TH., Souliotis, M., Yianoulis, P., 2002. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Solar Energy, vol. 72, n. 3, pp. 217 - 234.

VALIDATION OF THERMAL BEHAVIOR MODELS OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN THE BRAZILIAN SEMIARID REGION

Abstract. *The operating temperature of photovoltaic modules (PV) influences the performance, because as temperature increases, the open circuit voltage and theoretical maximum power decreases. The main goal of the present article is evaluating the adequacy of equations developed for Duffie and Beckman (2013), Ross (1976) and Chenni et al. (2007) to describe thermal behavior of PV cells in Brazilian semiarid region's climatic conditions. The parameters utilized in those methodology are obtained for data acquisition system (Online Monitoring System - REMS) which acquires sensors measured data every minute. The graphs are built based on measurements and proposed equations, in two weeks of August and September 2017. The curves visualization of PV cells operating temperature show a large variation between real and estimated operating temperature by methods analyzed, mainly, in hours of large irradiation incidence and ambient temperature between 10:00 a.m. and 2:00 p.m. Within the limitation of our results and for this case, although any method analyzed be appropriated to temperature analysis, the thermal behavior is better described for Duffie and Beckman (2013). This method shows smaller average variation (approximately 13%) and smaller maximum error in August (9,2 °C) between estimated and measured operating temperatures given by investigated methodologies.*

Key words: *Photovoltaic solar energy, Thermal behavior, Operating temperature*