

Realização de um modelo térmico-elétrico para simulação unidimensional de um painel fotovoltaico

Realization of a thermal-electrical model for one-dimensional simulation of a photovoltaic panel

DOI:10.34117/bjdv7n3-048

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 02/03/2021

Lucas Haas

Graduação (em andamento)

Instituição: Centro de energias Alternativas e Renováveis (UFPB) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Endereço: UFPB -Universidade Federal da Paraíba; CEAR - Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970, Caixa Postal 5115. Telefone: +55 (83) 3216-7268

E-mail: lucas.haas@cear.ufpb.br

Fabiano Cordeira Cavalcanti

Doutorado

Instituição: Centro de energias Alternativas e Renováveis (UFPB) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Endereço: UFPB -Universidade Federal da Paraíba; CEAR - Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970, Caixa Postal 5115. Telefone: +55 (83) 3216-7268

E-mail: fabianofr@cear.ufpb.br

Cristiane Kelly Ferreira da Silva

Doutorado

Instituição: Centro de energias Alternativas e Renováveis (UFPB) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Endereço: UFPB -Universidade Federal da Paraíba; CEAR - Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970, Caixa Postal 5115. Telefone: +55 (83) 3216-7268

E-mail: cristianek@cear.ufpb.br

Gilberto Augusto Amado Moreira

Doutorado

Instituição: Centro de energias Alternativas e Renováveis (UFPB) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Endereço: UFPB -Universidade Federal da Paraíba; CEAR - Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP: 58051-970, Caixa Postal 5115. Telefone: +55 (83) 3216-7268

E-mail: gilberto@cear.ufpb.br

Érico Tavares da Silva Falcão

Graduação

Endereço: Rua Napoleão Máximo da Silva, 146, Bairro Castelo Branco, João Pessoa - PB

E-mail: ericotsf@gmail.com

RESUMO

Um modelo de um painel fotovoltaico (painel *FV*) tem a função de simular o seu funcionamento, podendo assim estimar a quantidade de eletricidade que será gerada, ou estimar quantos painéis são necessários para gerar certa quantidade de eletricidade. O objetivo deste trabalho é o de desenvolver um modelo térmico-elétrico de um painel fotovoltaico, que possibilite a simulação de diferentes painéis, em diferentes condições climáticas. O modelo térmico, unidimensional e estacionário, foi acoplado ao modelo elétrico baseado no modelo de Villalva. A temperatura da célula fotovoltaica e a eficiência elétrica foram calculadas ao longo de dias simulados, e comparadas com as de outros modelos térmico-elétricos e puramente térmicos. As temperaturas calculadas apresentaram maior proximidade às do modelo térmico *T Faiman*, enquanto que a eficiência se comportou de maneira semelhante à do modelo térmico-elétrico *TE Smets*. As comparações realizadas indicaram que o modelo desenvolvido apresentou resultados semelhantes aos encontrados na literatura.

Palavras-chave: painel fotovoltaico, modelo térmico-elétrico, temperatura da célula, eficiência fotovoltaica.

ABSTRACT

A model of a photovoltaic panel (*PV* panel) is has the function of simulate its operation, in order to be able to estimate the amount of electricity generated, or to estimate how many panels are necessary to generate a certain amount of electricity. The objective of this work is to develop a thermal-electrical model of a photovoltaic panel, which allows to simulate different panels, in different climatic conditions. The thermal modeling, one-dimensional and stationary, was coupled to the electrical model based on the Villalva model. The photovoltaic cell temperature and electrical efficiency were calculated over simulated days, and compared with other thermal-electrical and purely thermal models. The calculated temperatures were closer to the *T Faiman* thermal model, while the efficiency behaved similarly to the *TE Smets* thermal-electrical model. The comparisons made indicated that the developed model presented similar results to those found in the literature.

Keywords: photovoltaic panel, thermal-electrical model, cell temperature, photovoltaic efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A influência humana no aquecimento global é clara. A concentração atmosférica de Gases do Efeito Estufa (*GEE*) aumentou a níveis sem precedentes, depois de ficar estável há pelo menos 800 mil anos (MATHEZ e SMERDON, 2018). Devido ao aumento da quantidade de moléculas absorvedoras de radiação infravermelha na atmosfera, como CO_2 , CO , SO_2 e SO_3 , a Terra está absorvendo mais energia do que emitindo. Diante deste

problema, a implementação de um fornecimento de energia limpa e sustentável é uma das medidas mais importantes para diminuir as emissões de *GEE*, e consequentemente prevenir o aquecimento global. Dentre as energias renováveis, a energia fotovoltaica é uma alternativa abundante e versátil, que não emite *GEE*.

Dentro deste contexto, a energia solar fotovoltaica (*FV*) é a fonte de energia elétrica que mais cresce, passando de 2% da geração de eletricidade mundial em 2018 (C2ES, 2020). De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2014), a energia *FV* será responsável por 16% da eletricidade mundial até 2050. Para atingir este objetivo, é necessário que a pesquisa e o estudo de painéis fotovoltaicos (painéis *FV*) também cresçam de maneira substancial.

Estudos experimentais sobre sistemas fotovoltaicos são financeiramente caros e algumas vezes tornam-se inviáveis. Portanto, dentro de uma primeira etapa, recomenda-se que os estudos sejam direcionados a partir de modelos matemáticos ou computacionais, os quais são capazes de simular com boa acurácia o comportamento destes sistemas (JAKHRANI, 2013). As seções 0, 0 e 0 deste trabalho trazem um resumo das diferentes abordagens empregadas na modelagem de painéis *FV*. Sendo classificadas como modelos puramente térmicos, puramente elétricos e térmico-elétricos.

A partir da revisão bibliográfica dos diferentes tipos de modelos de painéis *FV*, optou-se por se realizar a modelagem térmico-elétrica do painel, visto que os modelos térmico-elétricos descrevem melhor o painel *FV*, quando comparados com os modelos puramente térmicos ou puramente elétricos (TUZA e MAHIEDDINE, 2014). Na parte térmica da modelagem térmico-elétrica realizada, considerou-se o painel como sendo uma placa plana com temperatura longitudinal uniforme e em regime estacionário de transferência de calor. Considerou-se a temperatura variando somente ao longo da espessura do painel *FV*, formado por cinco camadas. E a modelagem elétrica, foi realizada a partir do modelo elétrico de Villalva et al. (2009).

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma modelagem térmico-elétrica de um painel fotovoltaico que levasse em conta os diferentes parâmetros elétricos, térmicos e geométricos presentes nos painéis *FV*. O modelo desenvolvido foi aplicado em dias simulados e comparado com outros cinco modelos encontrados na literatura. Foram plotados gráficos das variações da temperatura da célula fotovoltaica (T_{cel}) e da eficiência elétrica (η) do painel *FV* ao longo do dia médio para os meses de março, junho, setembro e dezembro. Os parâmetros climatológicos utilizados como variáveis de entrada nas simulações correspondem à localização geográfica do Centro de Energias

Alternativas e Renováveis (CEAR), na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa, na Paraíba. Uma discussão sobre os resultados foi apresentada na seção 0.

1.1 MODELOS TÉRMICOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os modelos puramente térmicos caracterizam-se por inserirem-se neles dados climáticos e parâmetros termofísicos do painel *FV* pertinentes à troca de calor, de modo a se determinar a temperatura da célula *FV*, T_{cel} , a partir de balanços de energia no painel. Estes modelos diferem dos puramente elétricos pelo fato de considerarem os parâmetros termofísicos e geométricos dos diferentes materiais que compõem o painel.

O modelo térmico de Ross (1976) é muito referenciado na literatura, como em Skoplaki et al. (2008), Santiago et al. (2018) e em Cresesb (2020). T_{cel} é descrito como sendo proporcional à irradiância. O coeficiente de proporção, R , é referenciado como coeficiente de Ross nestas literaturas. R pode assumir valores entre 0,2 a 0,4, dependendo da montagem do painel *FV*. Neste trabalho, foi utilizado $R = 0,21$, retirado de Skoplaki et al. (2008), para montagem livre.

O software PVSyst (2021) é um software de simulação de sistemas fotovoltaicos, que utiliza uma equação para calcular a temperatura T_{cel} . Ele permite configurar os parâmetros descritos nesta equação, que são a absorvidade da célula *FV* (α_{cel}), a transmissividade do vidro (τ_v) e o coeficiente global de transferência de calor U , em W/m^2 .

Em seu modelo térmico, Faiman (2008) coletou dados de sete painéis *FV*, montados ao ar livre em arranjo simples e individual. Formulou uma equação para achar T_{cel} a partir de adaptações feitas na equação de *Hottel–Whillier–Bliss* para a eficiência de coletores solares planos.

1.2 MODELOS ELÉTRICOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os modelos puramente elétricos diferem dos térmicos por considerarem as características elétricas dos painéis *FV*. Os modelos elétricos necessitam de dois dados climatológicos, a irradiância solar (G_i) e a temperatura da célula *FV* (T_{cel}). Geralmente, estes modelos não levam em conta as propriedades termofísicas dos materiais que compõem o painel.

Villalva et al. (2009) utilizaram o modelo elétrico de um diodo prático (real) e obtiveram boa aproximação em relação aos dados fornecidos pelo fabricante. Um modelo semelhante é usado em Habbati (2014). O modelo de Villalva foi escolhido para este

trabalho devido à sua boa aproximação aos dados experimentais apresentados no seu trabalho.

Abunahla (2013) propôs um novo circuito elétrico, substituindo o diodo por um transistor de efeito de campo de tipo N (*MOSFET*). Comparou seu modelo com os de um e dois diodos, e seu modelo apresentou menor erro quando comparado aos dados fornecidos pelo fabricante.

Tamrakar et al. (2015) comparou o modelo de um diodo prático com o modelo de dois diodos. Observou que, nas curvas *V-I* (tensão-corrente) traçadas dos dois modelos, a de dois diodos é mais íngreme, ou seja, é menos idealizada que a curva de um diodo. Concluiu que o modelo de um diodo prático é aceitável para a utilização em projetos *FV*.

1.3 MODELOS TÉRMICO-ELÉTRICOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os modelos térmico-elétricos possuem a característica de levar em conta os parâmetros termofísicos, geométricos e elétricos do painel *FV*. Geralmente, resultam em uma solução acoplada de um modelo térmico com um elétrico.

Tuza e Mahieddine (2014) desenvolveram um modelo térmico usando o método dos elementos finitos, e o acoplaram a um modelo elétrico de dois diodos. Validaram seu modelo com dados experimentais e o comparam com outros modelos térmicos. Concluíram que todos os modelos térmicos subestimam T_{cel} e sobrestimam a potência elétrica gerada pelo painel *FV*, sendo o seu modelo térmico-elétrico o mais próximo aos dados experimentais coletados.

Smets et al. (2016) desenvolveram um modelo térmico-elétrico em seu livro. A modelagem térmica consiste em uma placa plana de temperatura uniforme em regime estacionário de troca térmica. São consideradas as perdas por radiação superior e inferior, convecção natural superior, e convecção forçada superior e inferior. As conduções de calor são desconsideradas. A modelagem elétrica é baseada nos coeficientes térmicos da corrente e da tensão fornecidos pelo fabricante.

King et al. (2004) desenvolveram um modelo térmico-elétrico empírico baseado em dados coletados ao longo de doze anos e testados em diferentes laboratórios. Foram coletados dados térmicos, como por exemplo, T_{cel} , e dados elétricos, como V_{mp} (tensão de máxima potência) e I_{mp} (corrente de máxima potência). Através de análises de regressão, calcularam sete coeficientes que permitem estimar os parâmetros elétricos e térmicos de painéis *FV*.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho para a construção do modelo térmico-elétrico consistiu basicamente de três etapas. Na primeira, realizou-se uma modelagem dos dados climatológicos para a localidade de simulação do painel *FV*. Depois, elaborou-se um modelo puramente térmico baseado no conceito de resistências térmicas. Em seguida, realizou-se o modelo puramente elétrico proposto por Villalva et al. (2009). Por fim, executou-se a solução acoplada dos dois modelos.

2.1 MODELAGEM DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS

Foram selecionados quatro meses para a modelagem dos dados climatológicos, sendo estes os meses de solstícios (dezembro e junho) e equinócios (março e setembro). Os dados climatológicos foram coletados no site da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2020). Os valores coletados são dados diários médios mensais que foram aplicados no dia médio de cada mês, os quais correspondem as seguintes datas: 16/03, 11/06, 15/09 e 11/12. As coordenadas inseridas no site para a coleta de dados climáticos foram as do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa, Paraíba, de latitude $\phi = -7,14^\circ$ e longitude $l = -34,85^\circ$.

A velocidade do vento coletada no site da NASA é medida para a altura de 10m em relação ao solo, enquanto que o painel *FV* foi simulado para a altura de 1,5m. Portanto a equação da lei da potência dos ventos, descrita em Davis e Masten (2016) foi utilizada para estimar a velocidade do vento na altura do painel.

O Quadro 1 apresenta os dados climáticos médios mensais de irradiação solar total horizontal (\bar{H}), de irradiação solar difusa horizontal (\bar{H}_d), de velocidade do vento medida a 10m do solo (V_1), de velocidade do vento corrigida para 1,5m de altura do solo (V_2) e de temperatura ambiente (T_∞). Esses dados foram então aplicados para o dia médio dos meses de março, junho, setembro e dezembro.

Quadro 1 - Dados climatológicos de João Pessoa – PB: aplicados ao dia médio de cada mês.

MÊS/DIA MÉDIO	\bar{H} (kWh/m ² /dia)	\bar{H}_d (kWh/m ² /dia)	V_1 10m (m/s)	V_2 5m (m/s)	T_∞ (°C)
Março/(16/03)	5,5	2,23	4,9	3,69	27,45
Junho/(11/06)	4,17	1,7	5,9	4,44	25,61
Setembro/(15/09)	5,64	2,04	6,19	4,66	25,09
Dezembro/(11/12)	6,06	2,11	5,72	4,3	27,07

Fonte: adaptado da NASA (2020).

Para simular o funcionamento do painel *FV* ao longo do dia médio para cada mês indicado no Quadro 1, foi adotada uma variação de irradiância solar com intervalos de tempo de 10 minutos ao longo do dia, totalizando 78 intervalos de tempos entre o nascer e o pôr do Sol de cada dia médio. Considerou-se que o painel se encontra localizado nas mesmas coordenadas geográficas do CEAR, com uma inclinação em relação à horizontal de $\beta_i = 10^\circ$ e com a face coletora voltada para o norte geográfico.

A determinação da irradiância solar para intervalos de tempo de 10 minutos, ao longo de cada do dia médio, a partir dos valores médios mensais de irradiação total e difusa (Quadro 1) foi realizada via adaptação da metodologia descrita em Duffie e Beckman (2013). A Equação (1) fornece o valor da irradiância solar total (W/m²) sobre a superfície inclinada do painel *FV*.

$$G_i = R_b(G - G_d) + G_d \left(1 + \frac{\cos\beta_i}{\gamma}\right) + G\rho_g \left(1 - \frac{\cos\beta_i}{\gamma}\right) \quad (1)$$

Onde R_b é o fator de elevação da radiação solar direta, G é a irradiância solar total horizontal (W/m²), G_d é a irradiância solar difusa horizontal (W/m), e ρ_g é o albedo do terreno na vizinhança do painel *FV*.

2.2 MODELO TÉRMICO

Para a modelagem térmica adotou-se um regime de transferência de calor estacionário e unidimensional na direção transversal à área superficial do painel *FV*. A conservação da energia foi aplicada ao painel considerando a existência de condução de calor ao longo das cinco principais camadas de materiais que o compõem (Figura 1 Figura 1). Os parâmetros geométricos e termofísicos do painel estão listados no Quadro 2.

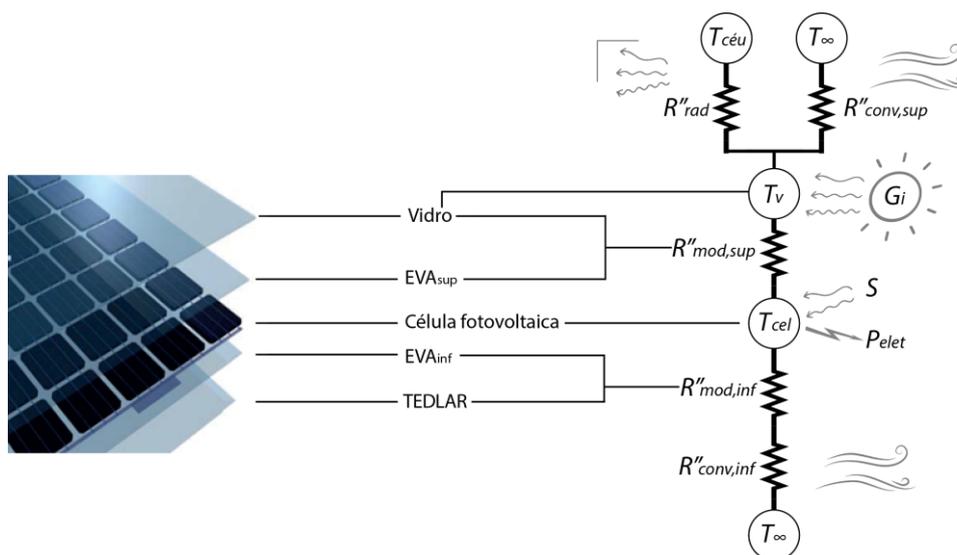


Figura 1 - Circuito térmico ao longo das diferentes camadas do painel FV.
Fonte: Autor.

Os parâmetros geométricos foram retirados do *datasheet* do fabricante (UPSOLAR, 2020). Com relação à célula *FV*, o fabricante não informou o valor exato da sua espessura. Porém, admitiu-se que ela deveria ser muito fina em relação às outras camadas de materiais. Sendo assim, considerou-se desprezível o valor da sua resistência térmica. Os valores das condutividades térmicas dos materiais indicados no Quadro 2 foram retirados de Andrade (2008).

A temperatura que interessa ao cálculo é a temperatura da junção *P-N*, ou a temperatura da célula *FV*, T_{cel} . Para calculá-la, realizou-se um balanço de energia que levou em conta os ganhos de energia oriundos da irradiância solar total incidente sobre o vidro do painel (G_i) e a irradiância solar absorvida pelas células *FV* (S). Também foram consideradas no balanço as perdas convectivas de energia para o ar ambiente acima e abaixo do painel (T_{∞}) e as perdas radiativas da parte superior do painel para a vizinhança ($T_{céu}$). As perdas radiativas referentes à parte inferior do painel para a vizinhança foram desprezadas.

Quadro 2 - Parâmetros geométricos e termofísicos do painel fotovoltaico UP-M335P.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	SIGLA	VALOR
Número de Células	N_s	72 (6 x 12)
Espessura do vidro	L_v	3,20 (mm)
Espessura EVA inferior	$L_{EVA,inf}$	0,45 (mm)
Espessura EVA superior	$L_{EVA,sup}$	0,45 (mm)
Espessura TEDLAR	L_T	0,20 (mm)
Espessura total do painel	L_{tot}	40 (mm)
Comprimento do painel	L_c	1956 (mm)
Largura do painel	L_l	992 (mm)
Condutividade térmica do vidro	k_v	1,13 (W/mK)
Condutividade térmica do EVA	K_{EVA}	0,15 (W/mK)
Condutividade térmica do TEDLAR	k_T	0,24 (W/mK)

Fonte: adaptado do datasheet do fabricante em Upsolar (2020) e de Andrade (2008).

As perdas de calor são representadas pelas resistências à convecção $R''_{conv,sup}$ e $R''_{conv,inf}$, e pela resistência à radiação, R''_{rad} , em m^2K/W . Os subscritos *sup* e *inf* fazem referência às superfícies superior e inferior do painel *FV*. As resistências $R''_{mod,sup}$ e $R''_{mod,inf}$, em m^2K/W , representam as resistências equivalentes à condução de calor das diferentes camadas do painel, especificadas à esquerda do circuito térmico, na Figura 1. A irradiância solar que incide sobre a superfície superior do vidro é G_i . A temperatura da superfície superior do vidro é T_v .

Realizou-se um balanço térmico em torno das duas incógnitas, T_{cel} e T_v . Sendo o balanço em torno de T_v dado pela Equação 2.

$$\frac{T_\infty - T_v}{R''_{conv\ sun}} + \frac{T_{c\acute{e}u} - T_v}{R''_{rad}} + \alpha_v G_i + \frac{T_{cel} - T_v}{R''_{mod\ sun}} = 0 \quad (2)$$

O balanço em torno de T_{cel} é dado pela Equação 3.

$$\frac{T_v - T_{cel}}{R''_{mod\ sun}} + \frac{T_\infty - T_{cel}}{R''_{conv\ inf} + R''_{mod\ inf}} + S = \frac{P_{elet}}{\acute{a}rea} \quad (3)$$

Onde P_{elet} , em W, é a potência elétrica gerada pelo painel, $\acute{a}rea$ é a área transversal do painel, em m^2 , e S , em W/m^2 , é a parcela da irradiância solar total que é absorvida pelas células *FV*, dada pela Equação 4,

$$S = (\alpha_{cel}\tau_v)_n \left(R_b K_b (G - G_d) + G_d K_d \left(1 + \frac{\cos\beta_i}{2} \right) + G_{\rho_g} K_g \left(1 - \frac{\cos\beta_i}{2} \right) \right) \quad (4)$$

Onde $(\alpha_{cel}\tau_v)_n$ é o produto da absorptividade da célula *FV* pela transmissividade do vidro para a direção normal de incidência da radiação solar. Os parâmetros K_b , K_d e K_g são os modificadores do ângulo de incidência da radiação solar direta, difusa e refletida pelo solo, conforme descrito em Duffie e Beckman (2003).

As resistências nos balanços térmicos das equações (2) e (3), em m^2K/W , são:

$$R''_{mod,sup} = \frac{L_v}{k_v} + \frac{L_{EVA,sup}}{K_{EVA}} \quad (5)$$

$$R''_{conv,sup} = \frac{1}{\bar{h}_{conv,sup}} \quad (6)$$

$$R''_{rad} = \frac{1}{\bar{h}_{rad}} \quad (7)$$

$$R''_{conv,inf} = \frac{1}{\bar{h}_{conv,inf}} \quad (8)$$

$$R''_{mod,inf} = \frac{L_T}{k_T} + \frac{L_{EVA,inf}}{K_{EVA}} \quad (9)$$

O coeficiente radiativo \bar{h}_{rad} (W/m^2K), presente na Equação (7), é calculado com a Equação (10).

$$\bar{h}_{rad} = \varepsilon_v \sigma (T_v^2 + T_{céu}^2) \cdot (T_v + T_{céu}) \quad (10)$$

Os coeficientes convectivos $\bar{h}_{conv,sup}$ e $\bar{h}_{conv,inf}$ (W/m^2K), presentes nas Equações (6) e (8), são calculados com a Equação (11) (INCROPERA, 2017).

$$\bar{h} = \frac{0,86 Re_{L_c}^{1/2} Pr^{1/3} k_f}{L_c} \quad (11)$$

Onde k_f (W/mK) e Pr representam respectivamente a condutividade térmica e o número de Prandtl do ar ambiente no entorno do painel; Re_{L_c} é o número de Reynolds para o comprimento do painel, L_c .

2.3 MODELO ELÉTRICO

O modelo elétrico desenvolvido foi o de um diodo prático, baseado no modelo desenvolvido por Villalva et al. (2009). O circuito elétrico que representa um painel *FV*, na Figura 2, pode ser descrito como uma fonte de corrente que representa a corrente fotogerada, um diodo que consome uma quantidade de corrente descrita pela equação de Shockley (VILLALVA et al., 2009) e mais duas resistências.

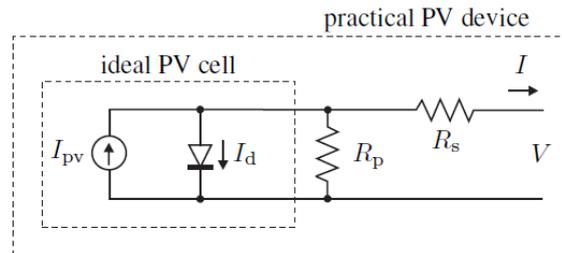


Figura 2 - Circuito elétrico que representa uma célula fotovoltaica ideal, e circuito que representa uma célula fotovoltaica real (prática).
Fonte: Villalva et al. (2009).

A resistência elétrica em paralelo R_p , em Ω , representa a corrente de fuga, que depende do método de fabricação utilizado, e a resistência em série R_s , em Ω , representa as perdas estruturais do painel fotovoltaico. A equação que rege o circuito da Figura 2 é a Equação (12),

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (12)$$

Onde I (A) e V (V) são respectivamente a corrente e a tensão geradas pelo painel *FV*, I_o (A) é a corrente de fuga do diodo, a é a constante de idealidade do diodo e $V_t = (N_s kb T_{cel})/q$ é a tensão térmica do diodo, em V. Sendo N_s o número de células conectadas em série, q a carga de um elétron ($1,60218 \times 10^{-19}$ C) e kb a constante de Boltzmann ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K). Este modelo é o mais usado na literatura, muitas vezes referido como modelo de cinco parâmetros (I_{pv} , R_s , R_p , a , I_o) (ABUNAHLA, 2013) (DUFFIE e BECKMAN, 2003).

A corrente gerada pelo painel *FV*, em A, é calculada pela Equação (13).

$$I_{pv} = (I_{pvm} + \alpha dT) \frac{G_i}{G_{stc}} \quad (13)$$

Onde α ($A/^{\circ}C$) é o coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito, dT ($^{\circ}C$) é igual a diferença entre a temperatura da célula T_{cel} e a sua temperatura padrão de testes $T_{stc} = 25^{\circ}C$, $G_{stc}=1000W/m^2$ é a irradiância padrão de testes e I_{pvn} (A) é calculado com a Equação (14),

$$I_{pvn} = \frac{R_s + R_p}{R_p} I_{scn} \quad (14)$$

Onde I_{scn} (A) é a corrente de curto circuito padrão. As resistências R_p e R_s necessitam de um método iterativo para serem calculadas.

A corrente de fuga I_o (A) é calculada com a Equação (15),

$$I_o = (I_{pv} - \frac{V_{oc}}{R_p}) / (\exp(\frac{V_{oc}}{aV_t}) - 1) \quad (15)$$

Onde V_{oc} (V) é a tensão de curto circuito, calculada com a Equação (16),

$$V_{oc} = (V_{ocn} + \beta dT) \frac{G_i}{G_{stc}} \quad (16)$$

Onde V_{ocn} (V) é a tensão de circuito aberto padrão e β ($V/^{\circ}C$) é o coeficiente de temperatura de V_{oc} .

A corrente I está implícita na Equação (12), sendo necessário para a sua determinação, portanto, o uso de algum método iterativo. Foi utilizado o método do próprio software MATLAB, através do comando *fzero*. Acha-se uma corrente I para cada tensão V da curva $V-I$. Em seguida, calcula-se a potência elétrica gerada, $P_{elet} = V.I$ (W). O par de V e I que geram a maior P_{elet} , chamada P_{max} , para determinados T_{cel} e G_i , tornam-se V_{mp} e, I_{mp} .

Enfim, calcula-se a eficiência elétrica do painel fotovoltaico com a Equação (17),

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_i \cdot \text{área}} \quad (17)$$

Onde $\text{área} = L_c \cdot L_b$, representa a área do painel fotovoltaico, em m^2 .

Os parâmetros elétricos do painel *FV* UP-M335P da Upsolar (2020) foram inseridos na modelagem elétrica. Os dados fornecidos pelo fabricante, mostrados no Quadro 3, são referentes às condições padrões de teste (*Standard Test Conditions – STC*).

Quadro 3 – Parâmetros elétricos do painel fotovoltaico UP-M335P.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	SIGLA	VALOR
Potência máxima	P_{stc}	335 (W)
Tensão de Potência Máxima	V_{mp}	37,3 (V)
Corrente de Potência Máxima	I_{mp}	8,98 (I)
Tensão de circuito aberto	V_{ocn}	47 (V)
Corrente de Curto Circuito	I_{scn}	9,22 (I)
Eficiência <i>STC</i>	η_{stc}	17,30%
Coef. de Temp. de V_{oc}	β	- 0,141 (V/°C)
Coef. de Temp. de I_{sc}	α	+0,00461 (%/°C)

Fonte: adaptado do datasheet do fabricante (UPSOLAR, 2020).

2.4 ACOPLAMENTO DOS MODELOS TÉRMICO E ELÉTRICO

Os modelos térmicos necessitam ser alimentados com a eficiência elétrica do painel *FV*, η . Nestes modelos adota-se, geralmente, a mesma equação de eficiência para vários tipos de painéis *FV*, não levando em conta as diferenças de propriedades elétricas que um painel tem em relação aos outros. Já os modelos elétricos, necessitam ser alimentados com a temperatura da célula *FV*, T_{cel} . Entretanto, T_{cel} muitas vezes é estimada incorretamente, sendo considerada igual à temperatura da superfície superior da placa de vidro ou da parte inferior do painel *FV*. Propõe-se, portanto, mesclar os modelos descritos nas seções 0 e 0 de modo a eliminarem-se estes dois problemas: o da eficiência η no modelo térmico, e o da temperatura T_{cel} no modelo elétrico.

O primeiro passo para a solução acoplada do modelo térmico-elétrico consiste em resolver a parte elétrica do modelo para chegar a um valor inicial da eficiência elétrica, η . Para esta primeira solução, atribui-se uma temperatura inicial para a célula *FV*, $T_{cel, inicial}$. Em seguida, soluciona-se a parte térmica do modelo térmico-elétrico, chegando a uma T_{cel} a partir da eficiência previamente calculada. Então, comparam-se as duas temperaturas, T_{cel} e $T_{cel, inicial}$. Se o módulo de diferença absoluta entre T_{cel} e $T_{cel, inicial}$ for maior ou igual ao *erro*, torna-se $T_{cel, inicial} = T_{cel}$. Reinicia-se o modelo elétrico. Por outro lado, se a nova diferença for menor do que o *erro*, o programa encerra com o valor final para T_{cel} . O esquema básico do procedimento supracitado está representado na Figura 3. Ressalta-se que procedimento deve ser executado para os 78 intervalos de tempo de 10 minutos entre o nascer e o pôr do Sol, para cada dia médio dos quatro meses selecionados.

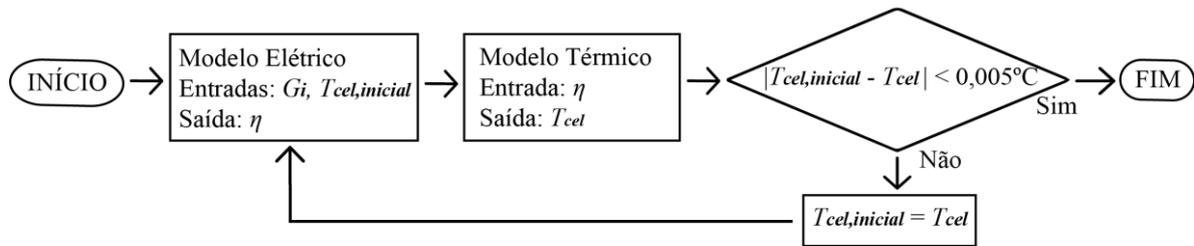


Figura 3 - Algoritmo do modelo térmico-elétrico.
Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores calculados com o modelo térmico-elétrico deste trabalho são representados nos gráficos a seguir como *TE Haas*, para a temperatura da célula *FV*, T_{cel} , e para a eficiência do painel *FV*, η . Eles foram plotados em função da hora legal do dia - do nascer até o pôr do Sol, em 78 intervalos de tempo de 10 minutos para cada dia médio adotado. Os resultados foram comparados com os de outros cinco modelos da literatura, sendo três deles os modelos puramente térmicos *T PVSyst*, *T Faiman* e *T Ross* (PVSYST (2021), FAIMAN (2008) e ROSS (1976)), resumidos na seção 0, e os dois modelos térmico-elétricos *TE King* e *TE Smets* (KING et al. (2004) e SMETS et al. (2016)), resumidos na seção 0.

As evoluções das temperaturas da célula *FV* e da eficiência do painel ao longo do dia médio de cada mês selecionado estão apresentadas nas Figuras 4 a 7.

Os gráficos de eficiências do painel *FV* calculados por cada modelo (Figuras 4(b) a 7(b)), apresentaram valores diferentes para cada dia médio, porém a forma das curvas de cada modelo permaneceu constante para todos os dias. De forma análoga, os gráficos de temperaturas da célula *FV* também apresentaram comportamentos semelhantes para cada modelo (Figuras 4(a) a 7(a)).

Dentre os quatro dias médios selecionados para estudo neste trabalho, o dia médio do mês de março (16/03) foi o que apresentou maiores valores de temperaturas da célula *FV*, T_{cel} , calculadas pelos modelos térmico-elétricos analisados (Figura 4(a)), para o meio dia solar - hora legal de 11h29. A ocorrência dessas temperaturas mais elevadas da célula *FV* é provavelmente ocasionada pela combinação da maior temperatura média do ar, T_{∞} , com a menor velocidade média do vento, V_2 , e com um bom valor de irradiação solar, para o mês supracitado (Quadro 1). Além disso, dentre os quatro dias médios, 16/03 corresponde ao dia em que trajetória aparente do Sol no céu passa mais próxima a latitude onde o painel se encontra, ou seja, a latitude do local ($\phi = -7,14^{\circ}$) é relativamente próxima

à declinação solar do dia 16/03 ($\delta = -2,42^\circ$). Isso favorece a captação da energia solar pelo painel, mas também pode contribuir para o seu aquecimento.

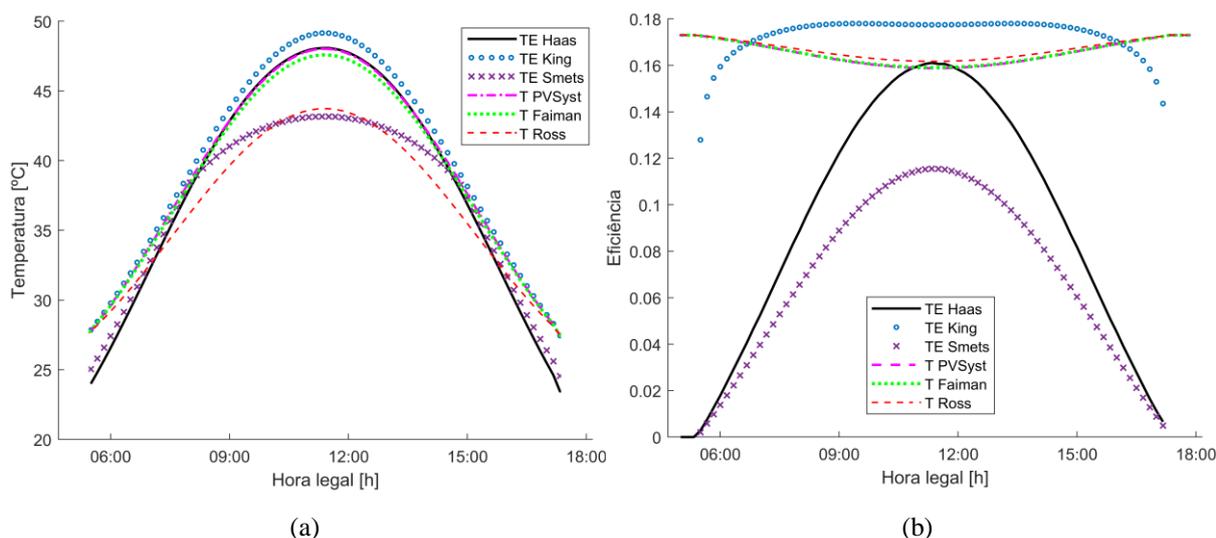


Figura 4 - Gráficos de comparação (a) da temperatura da célula fotovoltaica e (b) da eficiência do painel fotovoltaico ao longo do dia simulado 16/03, entre o modelo térmico-elétrico desenvolvido (TE Haas) e outros modelos.

Fonte: Autor.

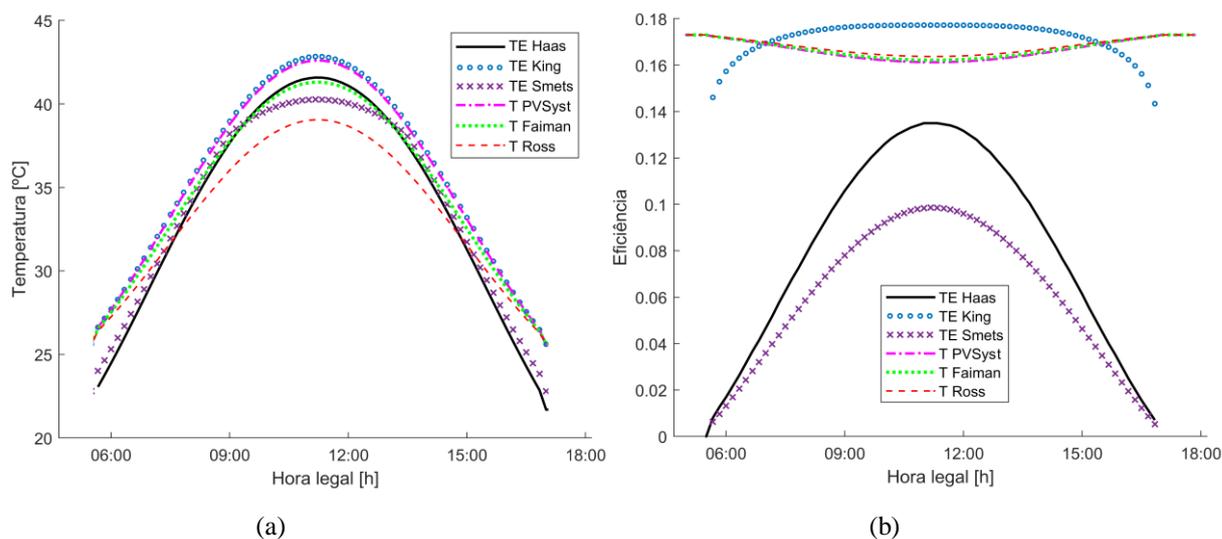


Figura 5 - Gráficos de comparação (a) da temperatura da célula fotovoltaica e (b) da eficiência do painel fotovoltaico ao longo do dia simulado 11/06, entre o modelo térmico-elétrico desenvolvido (TE Haas) e outros modelos.

Fonte: Autor.

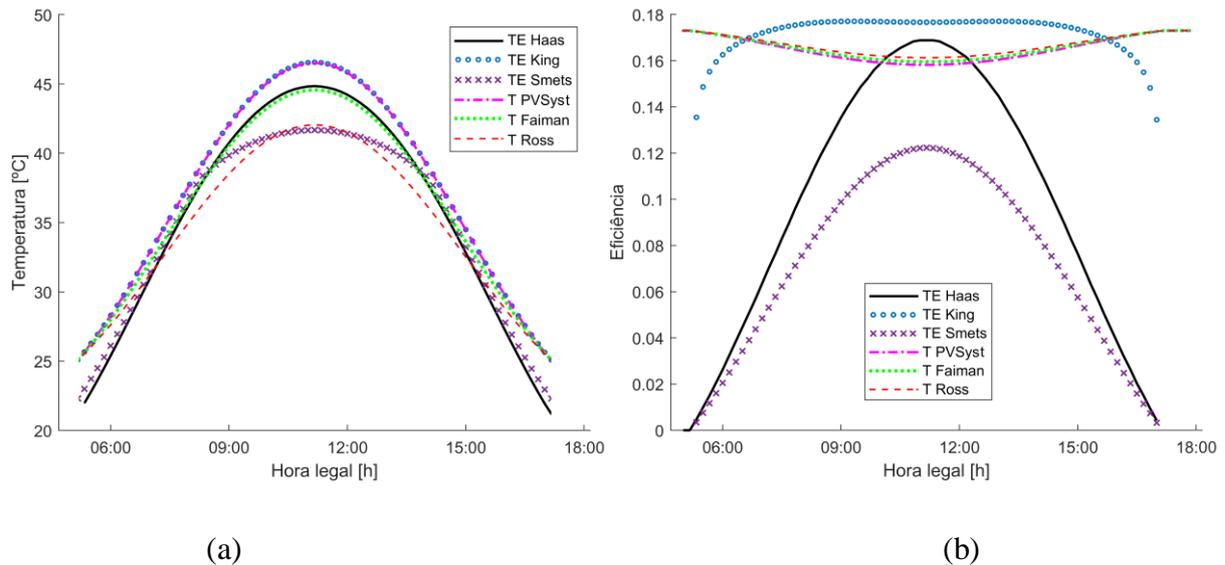


Figura 6 - Gráficos de comparação (a) da temperatura da célula fotovoltaica e (b) da eficiência do painel fotovoltaico ao longo do dia simulado 15/09, entre o modelo térmico-elétrico desenvolvido (TE Haas) e outros modelos.

Fonte: Autor.

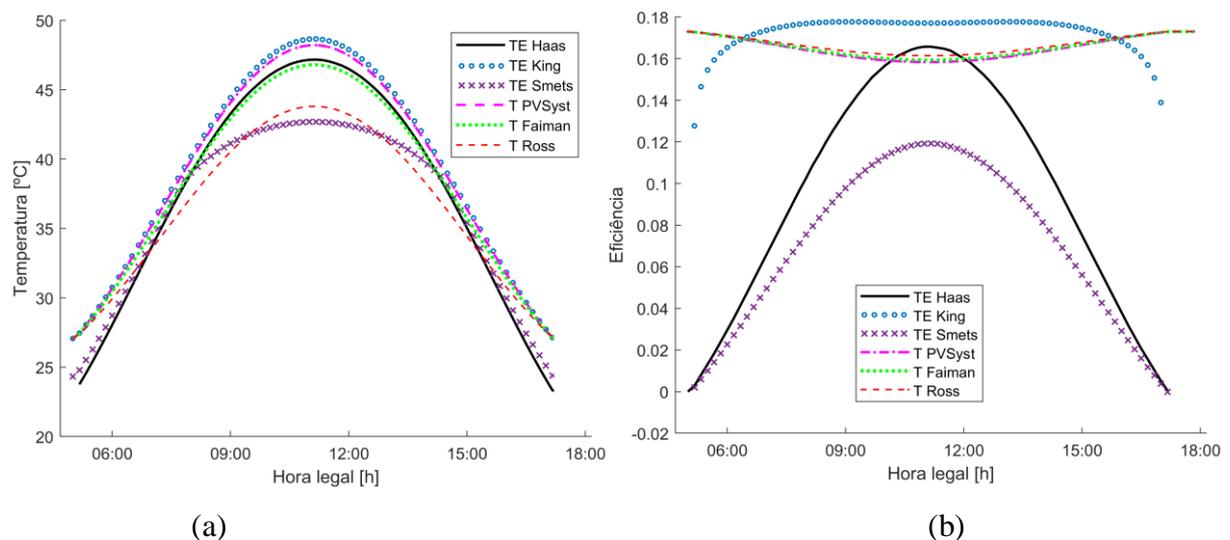


Figura 7 - Gráficos de comparação (a) da temperatura da célula fotovoltaica e (b) da eficiência do painel fotovoltaico ao longo do dia simulado 11/12, entre o modelo térmico-elétrico desenvolvido (TE Haas) e outros modelos.

Fonte: Autor.

6(a) foram um pouco superiores àquelas calculadas pelos mesmos modelos no dia médio 11/06 (Figura 5(a)).

De acordo com a Figura 7(a), para o dia médio que representa dezembro (11/12), os modelos puramente térmicos $T_{PVSystem}$, T_{Faiman} e T_{Ross} apresentaram valores elevados de T_{cel} para o meio dia solar (hora legal de 11h12), se comparados aos valores correspondentes aos dias médios 15/09 e 11/06, nas Figura 6(a) e 5(a), respectivamente. Observa-se que os valores de T_{cel} apresentados na Figura 7(a) são relativamente próximos

aos da Figura 4(a). Isso ocorre por que, apesar da trajetória aparente do Sol no céu estar longe da latitude onde o painel se encontra no dia 11/12 ($\delta = -23,05^\circ$), a irradiação solar \bar{H} é a mais elevada dentre os quatro meses analisados, devido à proximidade da data do solstício de verão (Quadro 1).

3.1 SOBRE AS TEMPERATURAS ENCONTRADAS

A temperatura mínima da célula *FV*, $T_{cel,min}$, é vista no começo e no final do dia, quando o Sol está nascendo e se pondo (Figuras 4(a) a 7(a)). Espera-se que quando não haja irradiação solar, que $T_{cel,min}$ seja semelhante à temperatura do ar T_∞ . Os modelos *TE Haas* e *TE Smets* apresentaram $T_{cel,min}$ semelhante, pouco abaixo de T_∞ . Isso aconteceu por que estes dois modelos se baseiam em balanços de energia térmica, nos quais perdem energia para $T_{céu}$, que é menor do que T_∞ . Os modelos *TE King*, *T PVSyst*, *T Faiman* e *T Ross* apresentaram $T_{cel,min} = T_\infty$.

A temperatura máxima da célula *FV*, $T_{cel,max}$, apresenta-se sempre ao meio dia solar (Figuras 4(a) a 7(a)). Percebe-se que a temperatura $T_{cel,max}$ dos modelos *TE Haas* e *T Faiman* são semelhantes. Esses dois modelos iniciam o dia com $T_{cel,min}$ diferentes, mas aproximam-se em $T_{cel,max}$ no meio dia solar.

O Quadro 4 apresenta as temperaturas médias da célula *FV* ($T_{cel,med}$, em °C), de cada modelo analisado, para cada dia médio simulado. A penúltima coluna deste Quadro apresenta a média de cada modelo das $T_{cel,med}$ para os quatro dias, $\bar{T}_{cel,med}$ (°C). A última coluna apresenta a diferença ($\Delta\bar{T}_{cel,med}$, °C) entre $\bar{T}_{cel,med}$ dos modelos *TE King*, *TE Smets*, *T PVSyst*, *T Faiman* e *T Ross* com relação ao modelo *TE Haas*. Para os quatro dias médios, os modelos que apresentaram os valores de $\bar{T}_{cel,med}$ mais próximos aos do modelo desenvolvido neste trabalho, *TE Haas*, foram o de *T Faiman* ($\Delta\bar{T}_{cel,med} = 0,428$ °C) e o de *T PVSyst* ($\Delta\bar{T}_{cel,med} = 1,111$ °C). O modelo de *TE King* foi que apresentou o valor de $\bar{T}_{cel,med}$ mais distante de *TE Haas* ($\Delta\bar{T}_{cel,med} = 1,364$ °C).

Quadro 4: Temperaturas médias da célula FV ($T_{cel,med}$), de cada modelo analisado, para cada dia médio simulado

MODELOS	DIA	16/3	11/6	15/9	11/12	$\bar{T}_{cel,med}$ (°C)	$\Delta\bar{T}_{cel,med}$ (°C)
<i>TE Haas</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	38,117	33,385	35,095	37,284	35,970	-----
<i>TE King</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	39,146	34,731	36,633	38,825	37,334	1,364
<i>TE Smets</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	36,195	32,861	34,119	35,889	34,766	-1,204
<i>T PVSys</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	38,535	34,606	36,606	38,581	37,082	1,111
<i>T Faiman</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	38,299	33,921	35,559	37,813	36,398	0,428
<i>T Ross</i>	$T_{cel,med}$ (°C)	36,223	32,729	34,204	36,180	34,834	-1,136

Fonte: Autor.

3.2 SOBRE AS EFICIÊNCIAS ENCONTRADAS

As curvas das eficiências elétricas do painel FV , η , calculadas pelos modelos analisados, para cada dia médio simulado (Figuras 4(b) a 7(b)), apresentaram formas distintas. As curvas de η dos modelos *TE Haas* e *TE Smets* apresentaram formas semelhantes às das curvas de T_{cel} das Figuras 4(a) 7(a). Os modelos *TE Haas* e *TE Smets* iniciam o dia com $\eta = 0$ e chegam ao meio dia solar com valores máximos de eficiências, sendo a η do modelo deste trabalho, *TE Haas*, mais alta. Esses dois modelos levam mais em conta a influência de G_i na eficiência η , do que a influência de T_{cel} em η .

Os três modelos puramente térmicos, *T PVSyst*, *T Faiman* e *T Ross*, começam e terminam o dia com $\eta = \eta_{stc}$, a eficiência padrão dada no Quadro 3. Ao longo do dia, com a proximidade do meio dia solar, η desses três modelos caem devido ao aumento de T_{cel} (Figuras 4(b) a 7(b)). Já o modelo *TE King* começa o dia com a eficiência η alta, em torno de 70% de η_{stc} . A eficiência η deste modelo cresce rapidamente, inclusive para valores acima de η_{stc} , e decresce levemente quando perto do meio dia solar. Esse decrescimento perto do meio dia solar indica que o modelo *TE King* leve mais em conta a influência de T_{cel} na eficiência η , do que a influência de G_i em η .

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo computacional de um painel FV visando obter dados mais realísticos referentes à determinação da temperatura da célula FV e da eficiência elétrica do painel. Sendo assim, realizou-se um modelo térmico-elétrico (*TE Haas*) baseado numa solução acoplada entre um modelo puramente térmico, baseado em balanços de energia térmica sobre o painel, e o modelo puramente elétrico do Villalva et al. (2009). O modelo térmico-elétrico resultante apresentou a vantagem de levar em conta tanto os parâmetros termofísicos e geométricos do painel como as suas características elétricas.

As temperaturas da célula *FV*, T_{cel} , calculadas com o modelo térmico-elétrico desenvolvido neste trabalho (*TE Haas*) foram relativamente próximas às T_{cel} encontradas pelos outros cinco modelos analisados (Figura 4(a) a 7(a)). Isso ficou mais evidente quando se compraram as temperaturas médias da célula, $T_{cel,med}$, calculas por *TE Haas* com as dos demais modelos (Quadro 4). Sendo assim, acredita-se que o modelo desenvolvido seja adequado para estimar a temperatura T_{cel} de painéis *FV*.

Quando não há radiação solar a corrente fotogerada I_{pv} é igual a 0. Isso faz com que a eficiência elétrica do painel *FV* seja nula (DURISCH, 2007). Sendo assim, espera-se que os modelos que iniciam o dia com $\eta=0$, *TE Haas* e *TE Smets*, tendam a descrever melhor o comportamento de η ao longo do dia (Figuras 4(b) a 7(b)). Estes dois modelos térmico-elétricos, *TE Haas* e *TE Smets*, apresentaram valores distintos para η , e não se pode concluir sobre qual dos dois modelos apresentou uma eficiência mais próxima daquela que seria encontrada na prática. Entretanto, as eficiências encontradas por *TE Haas* e *TE Smets* foram sempre inferiores à η_{stc} (Quadro 3). E isso é o que se espera de um painel *FV* em condições reais de funcionamento.

REFERÊNCIAS

ABUNAHLA, H. N. Modeling and Simulation of Photovoltaic Modules, (Master Thesis (Science in Electrical and Electronics Engineering), 2013.

ANDRADE, A. C. Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

C2ES, Renewable Energy - At a glance. Disponível em: c2es.org/content/renewable-energy. Acesso em: 15 mar. 2020.

CRESESB/CEPEL. Energia Solar - Princípios e Aplicações, 2014. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 15 mar. 2020.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. Principles of Environmental Engineering and Science. 3. ed., McGrawHill, 2016.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4^a ed., John Wiley & Sons, 2013.

DURISCH, W. et al., Efficiency model for PV modules and demonstration of its application to energy yield estimation, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007.

FAIMAN D., Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules, Progress In Photovoltaics: Research And Applications, 2008.

IEA - International Energy Agency. How solar energy could be the largest source of electricity by mid-century. Disponível em: www.iea.org/news. Acesso em: 12 fev. 2021.
INCROPERA, F. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa , 7^a ed., LTC, 2017.

HABBATI, B.; RAMDANI, Y.; MOULAY, F. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014.

JAKHRANI, A. Q. et al., Sensitivity Analysis of a Standalone Photovoltaic System Model Parameters. Journal of Applied Sciences, 2013.

KING, D. L. et al., Photovoltaic Array Performance Model, Sandia Report, 2004.
MATHEZ, E. e SMERDON, J. E., Climate Change - The Science Of Global Warming And Our Energy Future, Columbia University Press, 2018.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Prediction of Worldwide Energy Resource. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PVSYST - Array Thermal Losses, Disponível em: pvsyst.com/help/thermal_loss.htm. Acesso em: 12 fev. 2021.

ROSS, R. G., Interface design considerations for terrestrial solar cell modules, 12th Photovoltaic Specialists Conference, 1976.

SANTIAGO, I. et al., Modeling of photovoltaic cell temperature losses: A review and a practice case in South Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.

SKOPLAKI, E. et al. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008.

SMETS, A. et al., *Solar energy - The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, UIT Cambridge, 2016.

TAMRAKAR, V et al., Single-diode and Two-diode PV Cell Modeling using Matlab... *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*, 2015.

TUZA, A. O.; MAHIEDDINE, E. A Comparative Analysis of PV Module Temperature Models, *Energy Procedia* Volume 62, 2014.

UPSOLAR. UP-M335P Datasheet. Disponível em: neosolar.com.br. Acesso em: 17/05/2020.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Xplore*, 2009.