

## **Avaliação Analítica das Eficiências Térmicas e Elétricas de um Módulo Fotovoltaico Acoplado a um Coletor Solar de Placa Plana**

Maxwell Sousa Costa<sup>1</sup>

Anderson da Silva Rocha<sup>2</sup>

Lucas Paglioni Pataro Faria<sup>3</sup>

Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix

### **RESUMO**

O desenvolvimento de novas tecnologias para a utilização de fontes alternativas de geração de energia é fundamental para atender o aumento de demanda de energia elétrica. Dentre as tecnologias que vem sendo estudadas, destaca-se o PVT (do inglês *Photovoltaic Thermal*), que consiste no acoplamento de um trocador de calor à um módulo fotovoltaico com o intuito de resfriar as células do módulo, ocasionando um aumento na sua eficiência e produzindo, de forma simultânea, energia elétrica e térmica. A proposta deste trabalho é demonstrar o comportamento térmico e elétrico do PVT por meio de um modelo analítico, apresentando a relação do seu rendimento com a variação da temperatura de entrada do fluido que circulará no interior dos tubos do PVT. Os resultados obtidos demonstram que há um ganho energético global, quando o módulo PV é acoplado ao coletor solar de placa plana.

**Palavras-chave:** PVT, Energia Solar, Desempenho Térmico, Cogeração.

### **INTRODUÇÃO**

A constante busca por mecanismos mais eficientes e competitivos para utilização de energia renovável promove o desenvolvimento e a melhoria de tecnologias. O uso da energia solar para aquecimento de água e geração de energia elétrica, também tem sido alvo de pesquisas que visam à melhoria de sistemas existentes e a criação de novos

---

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. E-mail: maxwell.sousac@gmail.com

<sup>2</sup> Graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. E-mail: andersonrocha.adm@gmail.com

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix. E-mail: lucas.faria@izabelahendrix.edu.br

equipamentos (MOREIRA, 2009). Segundo Fernandes (2011), a energia solar é considerada ideal, no caso do Brasil, para levar energia às comunidades isoladas, distantes da rede elétrica. Com o desenvolvimento da tecnologia, consegue-se cada vez mais captar energia, até mesmo em dias nublados.

Souto (2009) destaca que o aproveitamento térmico da energia solar é uma das alternativas mais viáveis para substituição ou redução de chuveiros elétricos, a economia proporcionada pelos aquecedores de água é entendida como uma geração virtual de energia elétrica.

Conforme Almeida et al. (2015), a energia solar pode ser convertida em energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos ou módulos de geração de energia. Estes módulos são constituídos por células fotovoltaicas associadas, de acordo com cada projeto elas podem ser ligadas eletricamente, em série e/ou paralelo, dependendo das tensões e/ou correntes determinadas. Unindo esses módulos é possível obter um gerador fotovoltaico, que é o principal componente para o processo de captação da irradiação solar e a sua transformação em energia elétrica. Machado e Miranda (2015) ressaltam que a eficiência da maior parte dos módulos comerciais é de 15%.

O princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico é definido pela energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que é produzida com material semicondutor (PINHO; GALDINO, 2014).

Estudos tem mostrado que a temperatura ambiente é um fator que determina a eficiência de operação das células fotovoltaicas, e tem um papel significativo na geração de energia. O aumento da temperatura de célula provoca diminuição da tensão e elevação da corrente. Entretanto, o acréscimo na corrente é muito pequeno e insuficiente para compensar a perda de potência causada pela redução da tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

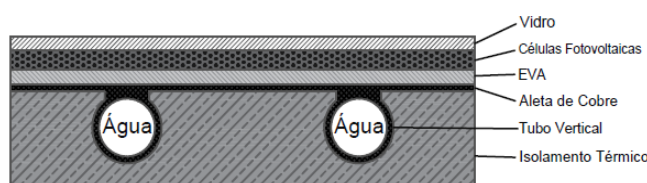
O PVT é uma tecnologia em que o módulo fotovoltaico não é utilizado somente para conversão da radiação solar em eletricidade, mas também como um absorvedor de calor, isto é, há produção de energia elétrica e térmica simultaneamente (ZONDAG, 2005).

A estrutura do PVT consiste basicamente, de um circuito hidráulico de um coletor solar de placa plana acoplada a um módulo fotovoltaico. O módulo funcionando como uma superfície absorvedora de calor é resfriado através da circulação de um fluido, que

geralmente é a água, provocando, dessa forma, há produção de energia elétrica e térmica simultaneamente (FARIA *et al.*, 2015).

Os estudos a respeito do PVT iniciaram em meados da década de 70 nos Estados Unidos. Ao longo dos anos uma grande quantidade de pesquisas tem originado o desenvolvimento de ideias de integração do sistema fotovoltaico com o sistema térmico em um único módulo (ZONDAG, 2005). Nos estudos de Chow (2009) e Zondag (2005) há uma revisão do estado da arte do PVT dos últimos 35 anos, focando nas pesquisas e tendências do desenvolvimento dessa tecnologia.

A figura 01 demonstra a estrutura de um PVT.



**FIGURA 1.** Estrutura de um PVT

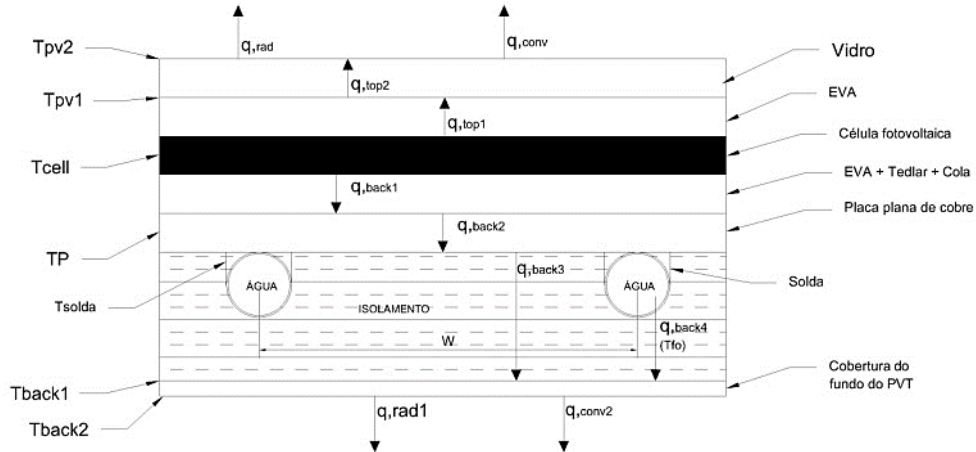
Segundo (ZONDAG, 2003) o PVT apresenta algumas vantagens:

- O PVT ocupa menos espaço no telhado do que um sistema convencional fotovoltaico e um sistema convencional de coletor térmico ocupariam para produzirem energia elétrica e térmica, o que é muito útil em situações em que o telhado possui uma área reduzida.
- O PVT interfere de forma menos significativa na estética do telhado, quando comparado com a instalação separada dos dois sistemas (fotovoltaico e térmico).
- Normalmente apenas um tipo de tecnologia de aproveitamento de energia é escolhido, sendo assim é possível uma redução de custo de aquisição do sistema com a utilização do PVT.

#### **- O Modelo Matemático**

O modelo matemático a ser apresentado para a avaliação do ganho energético do PVT foi baseado no modelo desenvolvido por Duffie e Beckman (2013) para coletores solares de placa plana. Com a integração da parte fotovoltaica aos coletores solares, são necessárias algumas modificações nas equações matemáticas descritas por esse modelo

numérico. Faria *et al.* (2015) descrevem todas as equações com as devidas modificações, com base no fluxo de energia no interior do PVT, demonstrado na figura 02.



**FIGURA 2.** Fluxo de Energia no PVT  
**Fonte:** (Faria *et al.*, 2015)

O modelo consiste, basicamente, no cálculo dos seguintes parâmetros:

**- Perdas de calor no topo do PVT ( $U_t$ ):**

$$q_{top} = q_{top1} + q_{top2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Onde:

$q_{top1}$  é o fluxo de calor para o ambiente por condução pelo topo do PVT:

$$q_{top1} = \frac{k_{eva}(T_{cell} - T_{pv1})}{\delta_{eva}} + \frac{k_{vidro}(T_{pv1} - T_{pv2})}{\delta_{vidro}} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

$K_{eva}$ : Condutividade térmica do EVA<sup>4</sup> (W/m.K);

$\delta_{eva}$ : Espessura da cobertura de EVA acima da célula (m);

$T_{cell}$ : Temperatura média da célula fotovoltaica (K);

$T_{pv1}$ : Temperatura interna da cobertura de vidro do PVT (K);

$K_{vidro}$ : Condutividade térmica da camada de vidro acima da célula fotovoltaica (W/m.K);

$\delta_{vidro}$ : Espessura da cobertura de vidro do PVT (m);

<sup>4</sup> Acetato de Etil Vinila

$T_{pv2}$ : Temperatura externa da cobertura de vidro do PVT (K);

$q_{top2}$  é o fluxo de calor para o ambiente por convecção e radiação pelo topo do PVT:

$$q_{top2} = h_w(T_{pv2} - T_a) + h_{rad,cs}(T_{pv2} - T_s) \left[ W/m^2 \right] \quad (3)$$

$h_w$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e a camada de ar próxima ( $W/m^2.K$ );

$T_a$ : Temperatura ambiente (K);

$T_s$ : Temperatura do céu (K);

$h_{rad,cs}$ : Coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e o céu ( $W/m^2.K$ );

$$q_{top} = U_t(T_{cell} - T_a) \left[ W/m^2 \right] \quad (4)$$

$U_t$ : Perdas térmicas pelo topo do PVT ( $W/m^2.K$ ).

#### - Perdas de calor na base ( $U_b$ ):

$$q_{back} = q_{back1} + q_{back2} + q_{back3} + q_{back4} \left[ W/m^2 \right] \quad (5)$$

$q_{back}$ : fluxo de calor pelas costas ( $W/m^2$ );

onde:

$q_{back1}$  é o fluxo através da junção do EVA, tedlar e da cola:

$$q_{back1} = \frac{(T_{cell} - T_p)}{R_{back}} \left[ W/m^2 \right] \quad (6)$$

$T_p$ : Temperatura da placa plana do coletor (K);

$R_{back}$ : Resistência térmica de condução através das costas do PVT (K);

$q_{back2}$  é o fluxo de calor através do isolante:

$$q_{back2} = \frac{k_{isol, costas}}{\delta_{isol, costas}} (T_p - T_{back1}) \left[ W/m^2 \right] \quad (7)$$

$k_{isol, costas}$ : Condutividade térmica da camada de isolamento térmico colocado nas costas do PVT ( $W/m.K$ );

$\delta_{isol, costas}$ : Espessura da camada de isolamento térmico colocado nas costas do PVT (m);

$T_{back1}$ : Temperatura interna da camada de fechamento das costas do PVT (K).

$q_{back3}$  é o fluxo de calor através da parte de trás do PVT:

$$q_{back3} = \frac{k_2}{\delta_2} (T_{back1} - T_{back2}) \left[ W/m^2 \right] \quad (8)$$

$k_2$ : Condutividade térmica da folha de alumínio que faz o fechamento das costas do PVT (W/m.K);

$\delta_2$ : Espessura da folha de alumínio que faz o fechamento das costas do PVT (m);

$T_{back2}$ : Temperatura externa da camada de fechamento das costas do PVT (K).

$q_{back4}$  é o fluxo de calor por convecção e radiação na parte de trás do PVT:

$$\begin{aligned} q_{back4} = & h_{conv,total,back} (T_{back2} - T_a) + \\ & + F_{back,ground} h_{rad,back,sup} (T_{back2} - T_{sup}) \\ & + F_{back,ceu} h_{rad,back,ceu} (T_{back2} - T_{sup}) \left[ W/m^2 \right] \quad (9) \end{aligned}$$

$h_{conv,total,back}$ : Coeficiente convectivo total de troca de calor entre as costas do PVT e o ar próximo (W/m<sup>2</sup>.K);

$F_{back,ground}$ : Fator que expressa o quanto do solo é visto pelas costas do PVT (adimensional);

$h_{rad,back,sup}$ : Coeficiente de troca de calor por radiação entre as costas do PVT e o solo (W/m<sup>2</sup>.K);

$T_{sup}$ : Temperatura da superfície do solo (K);

$F_{back,ceu}$ : Fator que expressa o quanto do céu é visto pelas costas do PVT (adimensional);

$h_{rad,back,ceu}$ : Coeficiente de troca de calor por radiação entre as costas do PVT e o céu (W/m<sup>2</sup>.K).

$$q_{back} = U_b (T_{cell} - T_a) \left[ W/m^2 \right] \quad (10)$$

$U_b$ : Perdas térmicas na base do PVT (W/m<sup>2</sup>.K).

#### - Perdas de calor pelas laterais ( $U_e$ )

$$U_e = \frac{k_{isol,lat}}{\delta_{isol,lat}} \times \frac{A_{lat}}{A_c} \quad (W/m^2.K) \quad (11)$$



$$q_{lat} = U_e(T_{cell} - T_a) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (12)$$

$U_e$ : Coeficiente de perdas térmicas na lateral do PVT ( $W/m^2K$ )

$k_{isol,lat}$ : Condutividade térmica do isolamento lateral do PVT ( $W/m.K$ );

$\delta_{isol,lat}$ : Espessura do isolamento lateral do PVT (m);

$A_{lat}$ : Área lateral do PVT ( $m^2$ );

$A_c$ : Área superior externa do PVT, é a área por onde a radiação solar penetra no PVT ( $m^2$ );

### - Perdas Totais ( $U_L$ )

O coeficiente de perdas totais  $U_L$  será dado por:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad \left[ \frac{W}{m^2.K} \right] \quad (13)$$

Fluxo das perdas de calor totais  $q_{total}$  do PVT:

$$q_{total} = U_L(T_{cell} - T_a) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (14)$$

Fluxo de calor da placa para os tubos verticais do PVT:

$$F = \frac{\tanh \frac{m(W-D_{te})}{2}}{\frac{m(W-D_{te})}{2}} \quad (15)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{\delta_{alerta} k_{aleta}}} \quad (16)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L(D_{te} + (W-D_{te})F)} + \frac{1}{h_{conv,f} \pi D_{te}} + \frac{1}{C_b} \right]} \quad (17)$$

$$W = \frac{Lh}{n} \quad [m] \quad (18)$$

$$h_{conv,f} = \frac{k_{wa} Nu^4}{D_{te}} \quad (19)$$

F: Fator de eficiência da aleta retangular (-);

m: Varável definida para facilitar as demonstrações matemáticas do modelo de coletor plano (-);

$F'$ : Fator de eficiência do coletor (-);

$C_b$ : Condutância do material que liga o tubo a placa plana (W/mK);

W: Distância existente entre aleta e o centro dos tubos verticais do PVT (m)

n: Quantidade de tubos verticais do PVT (-);

$h_{conv,f}$ : Coeficiente convectivo de transferência de calor para o escoamento de água pelos tubos verticais do PVT (W/m<sup>2</sup>K);

$K_{wa}$ : Condutividade térmica da água dentro dos tubos verticais do PVT (W/mK);

$N_{u4}$ : Número de Nusselt para o escoamento de água dentro dos tubos verticais do PVT (-);

$D_{te}$ : Diâmetro externo dos tubos verticais do PVT (m).

Fator de remoção do Coletor e Fator de fluxo ( $F_R, F''$ ):

$$F_R = \frac{m C_{pwa}}{A_c U_L} \left[ 1 - \exp \frac{-A_c F' U_L}{m C_{pwa}} \right] \quad (20)$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (21)$$

$F_R$ : Fator de remoção de calor do circuito hidráulico do PVT (-);

$F''$ : Fator de Fluxo do PVT (-);

### - Transferência total de energia

$$Q_u = A_c \left( S - U_L (T_p - T_a) \right) [W] \quad (22)$$

$$S = I_T \tau \alpha_{eff} \quad (23)$$

$$\tau \alpha_{eff} = \tau \alpha - \tau_{pv} n_{el} \quad (24)$$

Onde:

$Q_u$ : Energia transferida para água escoando pelos tubos verticais do PVT (W);

$T_p$ : Temperatura média da placa plana acoplada no módulo fotovoltaico (K);

S: Energia térmica disponível para ser transferida para a água no interior dos tubos, após descontada a energia elétrica gerada (W/m<sup>2</sup>);



$A_c$ : Área superior externa do PVT, é a área por onde a radiação solar penetra no PVT ( $m^2$ ).

$\tau\alpha_{eff}$ : Coeficiente de transmissividade-absortividade para o modelamento térmico, descontada a geração de energia elétrica pelas células fotovoltaicas (-);

$\tau\alpha$ : Coeficiente de transmissividade-absortividade do módulo fotovoltaico (-);

$n_{el}$ : Eficiência elétrica do PVT (-).

#### - Eficiência Térmica ( $\eta_t$ )

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (25)$$

$I_T$ : Radiação solar incidente que chega até a camada de vidro do PVT ( $W/m^2$ ).

#### - Eficiência Elétrica ( $\eta_{el}$ )

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{I_T A_c} \quad (26)$$

Onde  $P_{el}$  é a potência elétrica do PVT (W):

$$P_{el} = P_o \left( \frac{I_T}{I_{Ref}} \left( 1 - \gamma_T (T_{cell} - T_{Ref}) \right) \right) \quad (27)$$

$\gamma_T$ : Coeficiente de temperatura para a máxima potência do módulo fotovoltaico nas condições padrões de teste. ( $^{\circ}C^{-1}$ );

$T_{ref}$ : Temperatura de referência das células fotovoltaicas nas condições padrões de teste, igual a  $25^{\circ}C$ .

## METODOLOGIA

Essa pesquisa foi desenvolvida com base na literatura técnica, nos resultados provenientes de outras simulações numéricas concluídas por demais autores e por meio de uma simulação analítica do modelo matemático apresentado na teoria.

O objeto desse estudo teve como enfoque um módulo fotovoltaico comercial de um determinado fabricante, denominado também nesse texto como PV. O trocador de calor

utilizado para análise foi um coletor solar de placa plana (tubo-aleta), no qual foi integrado na superfície traseira do módulo PV.

Para a simulação do modelo matemático apresentado na teoria foi utilizado o *software Excel*. Todas as equações foram inseridas no programa e a partir dos dados técnicos fornecidos pelo fabricante do módulo, conforme tabela 1, e das condições de contorno, expostas pela tabela 2, elaborou-se as curvas de rendimento térmico e elétrico do PVT.

**TABELA 1** – Informações técnicas do módulo fotovoltaico

<b>Dados do Fabricante</b>	
Modelo	-
Fabricante	-
Material das Células	multi-cristalino
<b>Condições Padrão de Operação – STC</b>	
Potência Máxima	245 W
Tensão de Máxima potência (V <sub>mp</sub> )	29,80 V
Corrente de Máxima potência (I <sub>mp</sub> )	8,23 A
Tensão de Circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	36,90 V
Corrente de curto circuito (I <sub>sc</sub> )	8,91 A
Eficiência	14,80 %
<b>Condições Normais de Operação – NOCT</b>	
Máxima potência	175 W
Tensão de Máxima potência (V <sub>mp</sub> )	26,80 V
Corrente de Máxima potência (I <sub>mp</sub> )	6,58 A
Tensão de Circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	33,70 V
Corrente de curto circuito (I <sub>sc</sub> )	7,21 A
Temperatura de operação (T <sub>noct</sub> )	45 °C
<b>Outras Características Elétricas</b>	
Coefficiente de temperatura para a Tensão Voc	-0,36 %/°C
Coefficiente de temperatura para a Máxima potência	-0,46 %/°C
<b>Dimensões</b>	
Comprimento	1662 mm
Largura	990 mm
Espessura do conjunto	46 mm

**Fonte:** (Faria *et al.*, 2015)

**TABELA 2** – Características Construtivas do PVT

Largura	$9,90 \times 10^{-1}$ m
Comprimento	1,66 m
Área coletora	1,65 m <sup>2</sup>
Espessura total do PVT	$5,00 \times 10^{-2}$ m
Espessura do vidro	$3,00 \times 10^{-3}$ m
Espessura do EVA sobre a célula	$5,00 \times 10^{-4}$ m
Espessura do EVA abaixo da célula	$5,00 \times 10^{-4}$ m
Espessura do Tedlar	$1,00 \times 10^{-4}$ m
Espessura da cola	$5,00 \times 10^{-5}$ m
Espessura da aleta	$6,00 \times 10^{-4}$ m
Espessura do isolamento das costas	$4,50 \times 10^{-2}$ m
Espessura do isolamento lateral	$2,25 \times 10^{-2}$ m
Espessura do fechamento da parte superior	$1,00 \times 10^{-3}$ m
Condutividade do vidro	1,40 W/m K
Condutividade do EVA	$3,50 \times 10^{-1}$ W/m K
Condutividade do Tedlar	$2,00 \times 10^{-1}$ W/m K
Condutividade da cola	$8,50 \times 10^{-1}$ W/m K
Condutividade da aleta	$4,01 \times 10^2$ W/m K
Condutividade do isolamento do PVT	$4,00 \times 10^{-2}$ W/m K
Condutividade da solda	$5,00 \times 10^2$ W/m K
Afastamento entre os eixos dos tubos	$1,00 \times 10^{-1}$ m
Diâmetro dos tubos verticais	$1,00 \times 10^{-2}$ m
Número de tubos	10
Inclinação	30°

**Fonte:** (Faria *et al.*, 2016)

É importante ressaltar que alguns parâmetros variáveis, como as temperaturas da placa plana, da cobertura de vidro, da célula fotovoltaica, da camada de fechamento das costas do PVT, os números de Nusselt e a condutividade térmica da água dentro dos tubos verticais, não foram possíveis de calcular com o auxílio do Excel, portanto adotou-se os mesmos valores utilizados no trabalho de Faria *et al.* (2016).

Para uma possível comparação entre a eficiência elétrica do módulo PV com a tecnologia PVT, foi calculada a temperatura de operação da célula fotovoltaica, sem a influência da parte hidráulica, para uma radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, por meio da equação 28, apresentada por Zilles *et al.* (2012).

$$T_c = T_a + H_{t,\beta} \left( \frac{TNOC - 20^\circ}{800} \right) * 0,9 \quad (28)$$

Onde:

T<sub>c</sub>: Temperatura da célula fotovoltaica (°C);

T<sub>a</sub>: Temperatura ambiente medida (C°), adotou-se 25°C;

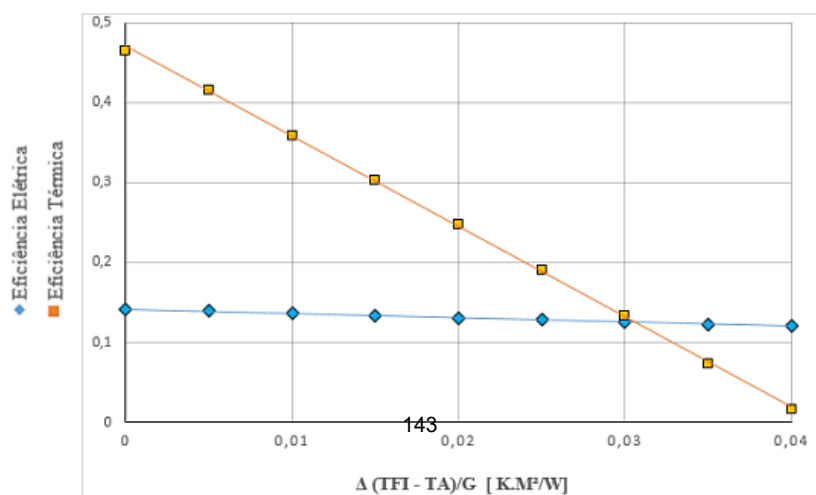
H<sub>t,β</sub>: Irradiância no plano do gerador (W/m<sup>2</sup>);

TNOC: Temperatura nominal de operação da célula (C°).

A partir do resultado da equação 28, calculou-se a máxima potência elétrica suprida pelo gerador fotovoltaico, equação 27, e posteriormente a sua eficiência elétrica, através da equação 26. De posse da eficiência elétrica do módulo PV e dos resultados simulados do modelo analítico, viabilizou-se uma comparação entre o PV e o PVT.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da Figura 3 apresenta as curvas linearizadas do desempenho térmico e elétrico do PVT para as condições de radiação solar (1000 W/m<sup>2</sup>) e temperatura ambiente (25°C).



**FIGURA 3.** Gráfico da eficiência térmica e elétrica do PVT

Variando a temperatura de entrada da água que circula no PVT, observa-se que a curva da eficiência térmica apresenta uma maior inclinação, demonstrando que esta é mais sensível com a mudança de temperatura do que a curva da eficiência elétrica.

A Tabela 3 foi utilizada para gerar o gráfico da figura 03, e permite uma melhor visualização da influência da temperatura de entrada da água nas eficiências térmica e elétrica do PVT.

**TABELA 3** – Desempenho elétrico e térmico do PVT

$T_{fi}$ (K)	$\frac{T_{fi} - T_a}{G}$ (K.m <sup>2</sup> /W)	$P_{el}$ (W)	$\eta_{elétrica}$	$\eta_{térmica}$
298,200	0,000	233,279	0,141	0,464
303,200	0,005	229,289	0,139	0,416
308,200	0,010	224,601	0,136	0,358
313,200	0,015	220,319	0,134	0,303
318,200	0,020	215,923	0,131	0,247
323,200	0,025	211,641	0,128	0,190
328,200	0,030	207,358	0,126	0,133
333,200	0,035	202,963	0,123	0,074
338,200	0,040	198,793	0,120	0,016

Os valores da temperatura de entrada da água utilizados na simulação foram definidos com base na temperatura normal de operação do módulo, que de acordo com as especificações do fabricante é de 45°C, sendo assim o intervalo escolhido compreende valores menores e maiores que 45°C (318,2 K).

É possível observar que quanto maior a temperatura de entrada da água menor será o rendimento térmico e elétrico do PVT. A circulação da água no módulo fotovoltaico, na condição padrão de operação – STC - permite o módulo operar com fornecimento de potência elétrica de aproximadamente 198W no pior dos casos analisados, onde a

temperatura da água é de 65°C. Essa potência, inclusive, é ainda maior que a potência fornecida nas especificações do fabricante do módulo fotovoltaico em estudo, nas condições normais de teste operacional – NOCT – que é de 175W com a célula a 45°C. Faria *et al.* (2015) fazem essa relação da temperatura de entrada da água que circula no PVT com as suas eficiências elétricas e térmicas, relatando que o PVT operaria com uma boa eficiência térmica, gerando mais energia elétrica, quando a temperatura da água do reservatório for inferior à temperatura do módulo fotovoltaico e próximo a temperatura ambiente.

Considerando as mesmas condições de radiação solar e temperatura ambiente utilizadas nas simulações do PVT, a temperatura de operação do módulo fotovoltaico, sem o acoplamento do trocador de calor, atingiria o valor de 53°C e o módulo teria uma eficiência elétrica de 12,93%, produzindo uma potência de 213,3 W. Com a integração do circuito hidráulico do coletor solar, o PVT chegaria a produzir 233,3W, ou seja, 9,3% a mais de produção de energia global, com temperatura de entrada da água a 25°C e a temperatura da célula a 35,6°C.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação apresentada neste trabalho permitiu observar o comportamento térmico e elétrico do PVT diante da variação da temperatura de entrada da água nos tubos verticais, a uma radiação solar constante. Os resultados demonstram que há uma vantagem em acoplar o coletor solar de placa plana no painel fotovoltaico a fim de arrefecer o módulo PV para aumento da sua eficiência elétrica. Contudo tal situação só ocorre quando a temperatura da água que entra no PVT for menor que a temperatura das células fotovoltaicas. Portanto a necessidade de controlar a entrada de água é fundamental para que não seja provocado um efeito reverso ao proposto pela tecnologia PVT.

É notável também que o PVT seja uma solução proveitosa para os locais que dispõem de pequenas áreas e que necessitam da energia elétrica e térmica, pois ele permite a coeração de ambas as formas de energia ocupando o mesmo espaço.

Por fim, torna-se importante a realização de pesquisas experimentais do modelo do PVT aqui demonstrado, para futuras comparações dos resultados práticos com o modelo teórico estudado, de forma que possíveis modificações sejam realizadas para que essa tecnologia seja difundida no mercado a custos acessíveis ao consumidor.



## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTOS, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. **Engenharias Online**, Universidade FUMEC, Belo Horizonte, v.1, n. 2, p. 21-33, 2015.

CHOW, T. T. A Review on Photovoltaic Thermal Solar Hybrid Solar Technology. **Applied Energy**, Hong Kong, China, n. 87, p. 365-379, jul. 2009.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 910p.

FARIA, L. P. P.; FERREIRA, A. G.; PEREIRA, E. M.; PROCÓPIO, O. L.; CALDEIRA, P.; MÁSSIMO, R.; DANIEL, A. C.; PORTO, M. A. D.; CORGOZINHO, I. M.; BARBOSA, J. M. C. Otimização da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2015, Costa do Sauípe. **Anais...**Costa do Sauípe: ANEEL, 2015.

FARIA, L. P. P.; FERREIRA, A. G.; PEREIRA, E. M.; PROCÓPIO, O. L.; CALDEIRA, P.; MÁSSIMO, R.; DANIEL, A. C.; PORTO, M. A. D.; CORGOZINHO, I. M.; BARBOSA, J. M. C.; SILVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, L. G. M. Análise do Desempenho Térmico e Elétrico de um Módulo Fotovoltaico Acoplado a um Coletor Solar Plano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABENS, 2016.

FERNANDES, D. **ONU diz que Brasil Subaproveita seu Potencial em Energias Renováveis**. 2011. Disponível em: <[http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2011/11/111129\\_energia\\_limpa\\_unctad\\_df](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2011/11/111129_energia_limpa_unctad_df)>. Acesso em: 20 maio 2016.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v.7, n.1, p.126-143, 2015. Disponível em <<http://www.uff.br/rvq>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

MOREIRA, M. F. Z. **Análise Térmica de um Coletor Solar Composto de Cavidades V para Aquecimento de Água**. 2009. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.



OLIVEIRA, P. H. M.; AGUIAR, E. S.; BASTOS, L. E. G. Análise Teórico-Experimental de um Coletor Híbrido Térmico-Fotovoltaico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 9., 2002, Caxambu. **Anais...** Caxambu: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002, ref. 2-646.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. CEPEL, CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

SOUTO, W. A. **Desenvolvimento de um Sistema Automatizado de Levantamento de Desempenho de Coletor Solar Plano**. 2009. 46f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo, SP, 2012.

ZONDAG, H.A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, n 12, p. 891-959, dec. 2005.