

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ELÉTRICO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO ACOMPLADO A UM COLETOR SOLAR PLANO

Othon Lucas Procópio – othon.procopio@gmail.com
André Guimarães Ferreira – agferreira@deii.cefetmg.br
Ivan M. Corgozinho – ivanmagela@yahoo.com.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG
Lucas P. P. Faria – lppf@ig.com.br
Elizabeth M. Pereira – bethduarte00@gmail.com
Rafael Máximo Martins – rafaelmassimo@hotmail.com
Rodrigo Andrade da Silveira – rodrigo.andrade@una.edu.br
Centro Universitário UNA
Luís Guilherme Monteiro Oliveira – luis.monteiro@pucminas.br
Santhiagu Lucas Procópio – santhiagulucas@live.com
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC MINAS
Alessandra Chagas Daniel – alessandra.daniell@cemig.com.br
Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG

Resumo. Aproximadamente 15% da radiação solar incidente em módulos fotovoltaicos (FV) poli-cristalinos são convertidos em energia elétrica, o restante ou é refletida ou é transformada em calor e como consequência, os painéis são aquecidos, ocasionando redução em sua eficiência elétrica, que é proporcional ao aumento de temperatura, e possível degradação física de suas células fotovoltaicas ao longo dos anos. Portanto, a elevação da temperatura de operação das células é um efeito indesejado, porém, inevitável, que pode ser reduzido com a integração dos módulos FV à uma placa absorvedora como às utilizadas em coletores solares planos que irão permitir a cogeração de calor e eletricidade, preservando a integridade física das células fotovoltaicas a partir da mesma área coletora. Dessa forma, esse trabalho propõe um modelo matemático para prever o comportamento/ desempenho térmico e elétrico de um módulo fotovoltaico acoplado a um coletor solar plano (Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector – PV/T, em inglês) em regime permanente a partir da variação da radiação solar incidente e da velocidade do vento.

Palavras-chave: Cogeração, Energia Solar, PV/T.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar pode ser utilizada de diversas formas sendo que duas aplicações são largamente empregadas, a de sistemas térmicos para conversão em calor e sistemas fotovoltaicos para conversão em eletricidade sendo que o uso dessas duas aplicações em conjunto, hibridação, vem sendo desenvolvido ao longo dos anos. As primeiras pesquisas sobre o uso conjunto da tecnologia de coletores solares planos e módulos fotovoltaicos, comumente designados por Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector – PV/T, em inglês, foram reportadas em meados da década de 70 e início dos anos 80, em sua grande maioria nos EUA e no Japão (influenciadas pelo embargo do petróleo de 1973 a 1974 (PALLA et al, 2014), na qual se utilizou o modelo de Hottel-Whiller, para avaliar o desempenho do aquecimento da água advindo da integração de sistemas térmicos e fotovoltaicos (DAGHIGH et al, 2010).

O crescimento e o desenvolvimento dos estudos de tecnologias de PV/T continuaram na década de 90, devido à crescente preocupação com as questões ambientais e também, ao interesse do ramo da construção, baseados na possibilidade de integrar os painéis fotovoltaicos e térmicos nas fachadas de edificações, já que a tecnologia PV/T apresenta uma estética melhor do que o uso de coletores planos e painéis fotovoltaicos dispostos separadamente lado a lado nas fachadas. Dessa forma, o acoplamento das duas tecnologias, além do benefício estético mencionado, permite uma economia de área, importante principalmente para locais com pouco espaço, onde haveria a necessidade de escolha entre uma tecnologia e outra. Além disso, a hibridação permite o benefício da redução da temperatura e consequente elevação da eficiência elétrica e preservação da integridade física das células fotovoltaicas (KOECH et al, 2012).

Diversas aplicações e projetos de demonstração integrados às edificações ocorreram na Europa e América do Norte, nos quais o uso de PV/T's com água como fluido de refrigeração teve melhor desempenho (CHOW, 2011). PALLA et al. (2014), desenvolveu modelo matemático para avaliar a eficiência elétrica e térmica do acoplamento de módulos fotovoltaicos e coletores solares planos e encontrou eficiências térmicas da ordem 50% e 40% e elétricas entre 9% e 12,1% para PV/T, com e sem coberturas de vidro respectivamente. A tecnologia de PV/T, como foi dito, trabalha normalmente com água ou ar como fluido refrigerante das células fotovoltaicas, na qual, sistemas operando com água possuem maior eficiência térmica e elétrica devido a maior capacidade da água em remover calor das células fotovoltaicas. Entretanto, sistemas que utilizam o ar são mais simples e apresentam custos mais baixos em sua construção

e podem ter sua eficiência global melhorada com o uso de exaustores para aumentar a vazão de ar, apesar de terem eficiência reduzida, pois, consomem parte da energia elétrica gerada pelos módulos para alimentar o ventilador (CHOW, 2011). Os PV/T's resfriados a ar, anexados as fachadas inclinadas, são capazes de manter a produção de energia elétrica constante, cobrindo a necessidade de aquecimento do ambiente durante o inverno e ventilação durante o verão, evitando o superaquecimento das edificações por interceptar a radiação solar e transferir o calor gerado para o ar (TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2007). Dessa forma, os PVT's com água ou ar como fluido refrigerante, podem ser aplicados aos diversos processos, tais como: refrigeração solar, dessalinização da água, estufas solares, integrado às edificações para refrigeração e aquecimento, o que demonstra a versatilidade dessa tecnologia (TYAGI, 2012).

Neste artigo, é proposto um modelo matemático para prever o comportamento/desempenho térmico e elétrico de um módulo fotovoltaico acoplado a um coletor solar plano (Photovoltaic Thermal Híbrido Solar Collector – PV/T, em inglês) em regime permanente a partir da variação da radiação solar incidente e da velocidade do vento de forma a fornecer subsídios teóricos fundamentais para a elaboração de protótipos de PV/T's conforme mostra a Fig. 1.

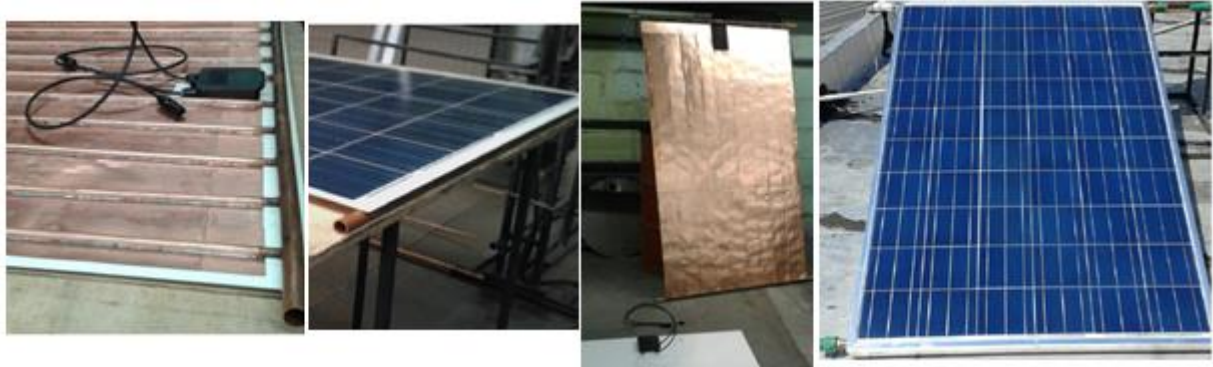


Figura 1 – Exemplo de protótipo de PV/T, antes e após a junção, construído e em fase de testes.

2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PVT

O modelo matemático proposto neste trabalho para a avaliação do desempenho térmico e elétrico de um PV/T é baseado no modelo de coletor solar plano tipo tubo aleta, descrito por DUFFIE & BECKMANN (2006), com as devidas modificações para a inclusão do módulo fotovoltaico, e também embasado no trabalho de FERREIRA et al. (2014), onde as equações para modelo matemático proposto são explicitadas e que foram adaptadas ao modelo para realização de simulações computacionais através do software Engineering Equation Solver (EES) disponibilizado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Na Fig. 2, é apresentado o circuito térmico equivalente para o modelo matemático desenvolvido e na Fig. 3 uma vista explodida de um PV/T.

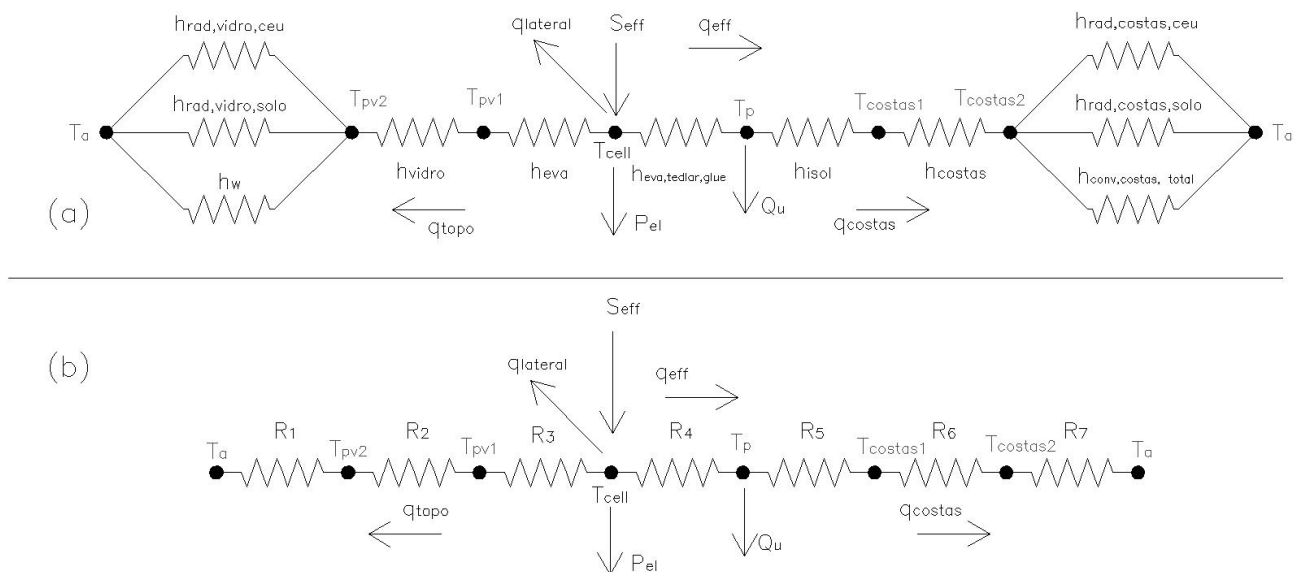


Figura 2 – Circuito térmico do PV/T: (a) Em termos das resistências de condução, convecção e radiação; (b) Em termos das resistências entre pontos de interesse.



Figura 3 – Vista explodida de um PV/T, alteração FERREIRA et al (2014)

2.1 Balanço de Energia pelo topo do PV/T

Após a concepção do circuito térmico e elétrico o mesmo foi modelado matematicamente de forma a se obter as principais equações para o modelo proposto e assim, o balanço de energia para o topo e também parte posterior do PV/T, portanto, o circuito apresentado na Fig. 2 pode ser representado pelas Eq. (1) à Eq. (12), topo, e Eq. (13) à Eq. (29), para a parte posterior.

$$(h_{rad,vidro,ceu} + h_{rad,vidro,solo} + h_w)(T_{pv2} - T_a) = h_{vidro}(T_{pv1} - T_{pv2}) \quad (1)$$

$$h_{vidro}(T_{pv1} - T_{pv2}) = h_{eva}(T_{cell} - T_{pv1}) \quad (2)$$

$$S = h_{eva}(T_{pv1} - T_{cell}) + P_{el} + h_{eva+tedlar+cola}(T_{cell} - T_p) \quad (3)$$

$$h_{rad,vidro,ceu} = F_{topo,solo} \sigma E_{sup}(T_{pv2}^2 - T_a^2)(T_{pv2} - T_a) \quad (4)$$

$$h_{rad,vidro,ceu} = F_{topo,ceu} \sigma E_c(T_{pv2}^2 - T_a^2)(T_{pv2} - T_a) \quad (5)$$

$$h_{vidro} = \frac{k_{vidro}}{\delta_{vidro}} \quad (6)$$

$$h_{eva} = \frac{k_{eva}}{\delta_{eva}} \quad (7)$$

$$h_{eva,tedlar,cola} = \frac{k_{eva,tedlar,cola}}{\delta_{eva,tedlar,cola}} \quad (8)$$

$$S = I_T \tau \alpha \quad (9)$$

$$S_{eff} = I_T \tau \alpha_{eff} \quad (10)$$

$$\tau \alpha_{eff} = \tau \alpha - \tau_{pv} \eta_{el} \quad (11)$$

$$P_{el} = P_o \left\{ \frac{I_T}{I_{ref}} [1 - \gamma_T(T_{cell} - T_{ref})] \right\} \quad (12)$$

Onde:

E_c : Emissividade da cobertura de vidro (-);

E_s : Emissividade do solo próximo ao PV/T (-);

$F_{topo,ceu}$: Fator que expressa o quanto do céu é visto pelo topo do coletor (-);

$F_{topo,solo}$: Fator que expressa o quanto do solo é visto pelo topo do coletor (-);

$h_{rad,vidro,ceu}$: Coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e o céu (W/m² K);

$h_{rad,vidro,solo}$: Coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e o solo (W/m² K);

$h_{conv,topo}$: Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vidro e a camada de ar próxima [10] (W/m² K);

I_T : Irradiância que incidente que chega até a camada de vidro do PV/T (W/m²);

I_{ref} : Irradiância utilizada no teste do módulo fotovoltaico nas condições padrão de teste (Standard Test Conditions – STC, em inglês) - (W/m²);

k_{eva} : Condutividade térmica do EVA (W/m K);

$k_{eva,tedlar,cola}$: Condutividade obtida da média da condutividade da camada de EVA, Tedlar abaixo das células FV e da cola utilizada para unir o módulo FV e as aletas do coletor solar térmico (W/m K);
 k_{vidro} : Condutividade térmica da camada de vidro acima da célula fotovoltaica (W/m K);
 P_{el} : Potencia elétrica fornecida pelo módulo admitindo que a mesma dependa apenas da temperatura da célula, para maiores detalhes ver ZILLES et al. (2012);
 q_{topo} : Fluxo de calor da célula FV para ambiente através do topo do PV/T (W/m²);
 q_{eff} : Fluxo de calor da célula FV para a placa do coletor solar acoplada ao módulo FV (W/m²);
 q_u : Fluxo de calor efetivamente transferido para a água circulando através do PV/T (W/m²);
 q_{costas} : Fluxo de perda de calor através das costas das costas do PV/T (W/m²);
 T_{cell} : Temperatura média da célula fotovoltaica (K);
 T_{pv1} : Temperatura interna da cobertura de vidro do PV/T(K);
 S : Irradiância que chega até o plano que contém as células FV (W/m²);
 V_w : Velocidade do vento sobre o topo PV/T (m/s).
 T_{pv2} : Temperatura externa do vidro do PV/T(K);
 T_a : Temperatura ambiente (K);
 T_p : Temperatura média da placa plana acoplada no módulo fotovoltaico (K);
 T_{ref} : Temperatura de referência das células fotovoltaicas para as condições padrões de teste, igual a 25° (STC – 1000 W/m², air mass AM de 1,5);
 β :Inclinação do PV/T e relação ao solo na horizontal (graus);
 δ_{eva} : Espessura da cobertura de EVA acima da célula(m);
 $\delta_{eva,tedlar,cola}$: Soma da espessura das camadas de EVA, Tedlar abaixo das células FV e da cola utilizada para unir o FV as aletas do coletor solar térmico (m);
 δ_{vidro} : Espessura da cobertura de vidro (m);
 σ : Constante de Stefan-Boltzman igual a $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$;
 $\tau_{\alpha_{eff}}$: Coeficiente de transmissividade-absortividade para o modelamento térmica, descontada à geração de energia elétrica pelas células fotovoltaicas. Para maiores detalhes ver ZONDAG (2013);
 τ_{α} : Coeficiente de transmissividade-absortividade para o módulo FV. Para maiores detalhes ver ZONDAG (2013);
 τ_{pv} : Coeficiente de transmissividade do vidro FV. Para maiores detalhes ver ZONDAG (2013);
 γ_T : Coeficiente de temperatura para a máxima potência do módulo FV nas condições padrão de teste - STC (°C⁻¹).

2.2 Balanço de Energia para a parte posterior do PV/T

$$h_{eva+tedlar+glue}(T_{cell} - T_p) = q_u + h_{isol}(T_p - T_{costas\ 1}) \quad (13)$$

$$h_{isol}(T_p - T_{costas\ 1}) = h_{costas}(T_{costas\ 1} - T_{costas\ 2}) \quad (14)$$

$$h_{costas}(T_{costas\ 2} - T_a) = h_{rad,costas,ceu}(T_{costas\ 2} - T_a) + h_{rad,costas,solo}(T_{costas\ 2} - T_a) + h_{conv,total}(T_{costas\ 2} - T_a) \quad (15)$$

$$q_{perdas} = q_{topo} + q_{costas} + q_{lateral} \quad (16)$$

$$h_{isol} = \frac{k_{isol}}{\delta_{isol}} \quad (17)$$

$$h_{costas} = \frac{k_{costas}}{\delta_{costas}} \quad (18)$$

$$h_{rad,costas,ceu} = (1 - F_{topo,ceu})\sigma E_{back}(T_{costas\ 2}^2 + T_a^2)(T_{costas\ 2} + T_a) \quad (19)$$

$$h_{rad,costas,solo} = (1 - F_{topo,solo})\sigma E_{back}(T_{costas\ 2}^2 + T_a^2)(T_{costas\ 2} + T_a) \quad (20)$$

$$h_{conv,total} = \sqrt[3]{h_{conv,costas,f}^3 + h_{conv,costas,n}^3} \quad (21)$$

$$h_{conv,costas,f} = \frac{k_a N_{uf}}{L_h} \quad (22)$$

$$h_{conv,costas,n} = \frac{k_a N_{un}}{L_h} \quad (23)$$

$$q_u = (S_{eff} - U_L(T_p - T_a)) \quad (24)$$

$$S_{eff} = I_T \tau_{\alpha_{eff}} \quad (25)$$

$$U_e = \frac{k_{isol,lat}}{\delta_{isol,lat}} \frac{A_{lat}}{A_c} \quad (26)$$

$$q_{lat} = U_e (T_p - T_a) \quad (27)$$

$$q_{total} = U_L(T_p - T_a) \quad (28)$$

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (29)$$

Onde:

$A_{lateral}$: Área lateral do PV/T (m²);

A_c : Área superior externa do PV/T, é a área por onde irradiação penetra no PV/T (m²);

E_{back} : Emissividade do acabamento da superfície da parte posterior do PV/T;

h_{isol} : Condutividade térmica do isolante colocado no fundo do PV/T (W/m²-K);

$h_{rad,costas,ceu}$: Coeficiente de transferência de calor por radiação entre a parte posterior do PV/T e o céu (W/m² K);

$h_{rad,costas,solo}$: Coeficiente de transferência de calor por radiação entre a parte posterior do PV/T e o solo (W/m² K);

$h_{conv,total}$: Coeficiente de convecção total da parte posterior do PV/T (W/m²-K);

$h_{conv,costas,f}$: Coeficiente de convecção forçada total da parte posterior do PV/T (W/m² K);

$h_{conv,costas,n}$: Coeficiente de convecção natural total da parte posterior do PV/T (W/m² K);

h_{costas} : Condutividade térmica através do fechamento da parte posterior do PV/T (W/m² K);

k_a : Condutividade do ar próximo a parte posterior do coletor (W/m K);

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

L_h : Comprimento horizontal do PV/T, considerando para incidência lateral de vento, na velocidade de V_w (m);

N_{uf} : Número de Nusselt para o escoamento de ar forçado nas costas do coletor (-);

N_{un} : Número de Nusselt para o escoamento de ar em circulação natural nas costas do coletor (-);

q_u : Calor efetivamente transferido para a água circulando através do PV/T;

T_p : Temperatura da placa plana do coletor tubo-aleta (K);

T_{costas_1} : Temperatura interna do fechamento da parte posterior do PV/T (K);

T_{costas_2} : Temperatura externa do fechamento da parte posterior do PV/T (K);

U_L : Coeficiente de perdas totais de calor do PV/T (W/m² K);

U_e : Coeficiente de perdas térmicas pela lateral do PV/T (W/m² K);

$\delta_{isol,lat}$: Espessura do isolamento lateral do PV/T (m).

2.3 Eficiência Térmica e Elétrica

O equacionamento da eficiência térmica e elétrica do PV/T é dado pela Eq. (30) e Eq. (31) e a Tab. 1 e Fig. 4. mostram as características do PV/T simulado no software Engineering Equation Solver (EES) e as especificações do módulo FV utilizado.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{I_T A_c} \quad (30)$$

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (31)$$

Onde:

η_{el} : Eficiência elétrica do PV/T (-);

η_t : Eficiência térmica PV/T (-);

Q_u : Calor útil transferido para a água (W);

Tabela 1 – Características do PV/T simulado.

Largura	0,99 m	Condutividade do vidro	1,40 W/m K
Comprimento	1,662 m	Condutividade do EVA	0,35 W/m K
Área coletora	1,65 m ²	Condutividade do Tedlar	0,20 W/m K
Espessura total do PV/T	0,05 m	Condutividade da cola	0,85 W/m K
Espessura do vidro	0,0030 m	Condutividade da aleta	401,0 W/m K
Espessura do EVA sobre a célula	0,00050 m	Condutividade dos isolamentos do PV/T	0,04 W/m K
Espessura do EVA abaixo da célula	0,00050 m	Condutância da solda	500,0 W/m K
Espessura do Tedlar	0,00010 m	Coefficiente convectivo nos tubos verticais	262,5 W/m ² K
Espessura da cola	0,000050 m	Afastamento entre os eixos dos tubos	0,1
Espessura da aleta	0,00060 m	Diâmetro do manifold	0,022 m
Espessura do isolamento das costas	0,045 m	Diâmetro dos tubos verticais	0,01 m
Espessura do isolamento lateral	0,02250 m	Número de tubos	10
Espessura do fechamento da parte posterior	0,0010 m	Inclinação	30 °

ELECTRICAL PERFORMANCE

At 1000 W/m ² (STC)*		
Maximum Power	245	W
Maximum Power Voltage (V _{mp})	29.8	V
Maximum Power Current (I _{mp})	8.23	A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	36.9	A
Short Circuit Current (I _{sc})	8.91	A
Efficiency	14.8	%
At 800 W/m ² (NOCT)**		
Maximum Power	176	W
Maximum Power Voltage (V _{mp})	26.8	V
Maximum Power Current (I _{mp})	6.58	A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	33.7	A
Short Circuit Current (I _{sc})	7.21	A
NOCT	45	°C
Other Electrical Characteristics		
Power Tolerance	+5/-3	%
Maximum System Voltage	1000	V
Maximum Reverse Current	15	A
Series Fuse Rating	15	A
Temperature Coefficient of (V _{oc})	-0.36	%/C
Temperature Coefficient of (I _{sc})	0.06	%/C
Temperature Coefficient of Max. Power	-0.46	%/C

MODULE CHARACTERISTICS

Dimensions		
Length	1662 (±2.5)	mm
Width	990 (±2.5)	mm
Depth (Including Junction Box)	46	mm
Weight	21	kg
Cable	(+)1190 / (-)960	mm
Connection Type	PV-03 (SMK)	
Junction Box	113 x 82 x 15	mm
Number of Bypass Diodes	3	
IP Code	IP65	
Cells		
Cell Per Module	60	
Cell Technology	multi-crystalline	
Cell Dimensions (Square)	156 x 156	mm
Cell Bonding	3 busbar	

* Electrical values under standard test conditions (STC) – irradiation of 1000 W/M², airmass AM 1.5, and cell temperature of 25°C.
 ** Electrical values under normal operating test conditions (NOCT) – irradiation of 800 W/M², airmass AM 1.5, wind speed of 1m/s, and ambient temperature of 20°C.
 KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

Figura 4 – Características do módulo FV utilizado.

3. RESULTADOS

Nas Fig. 5 e Fig. 6, podem ser observadas as eficiências térmicas e elétricas respectivamente obtidas da modelagem matemática /simulação numérica realizada, com a variação da velocidade do vento e irradiância incidente sobre o PV/T para as condições apresentadas na Tab. 1 e as características do módulo FV apresentada na Fig. 4.

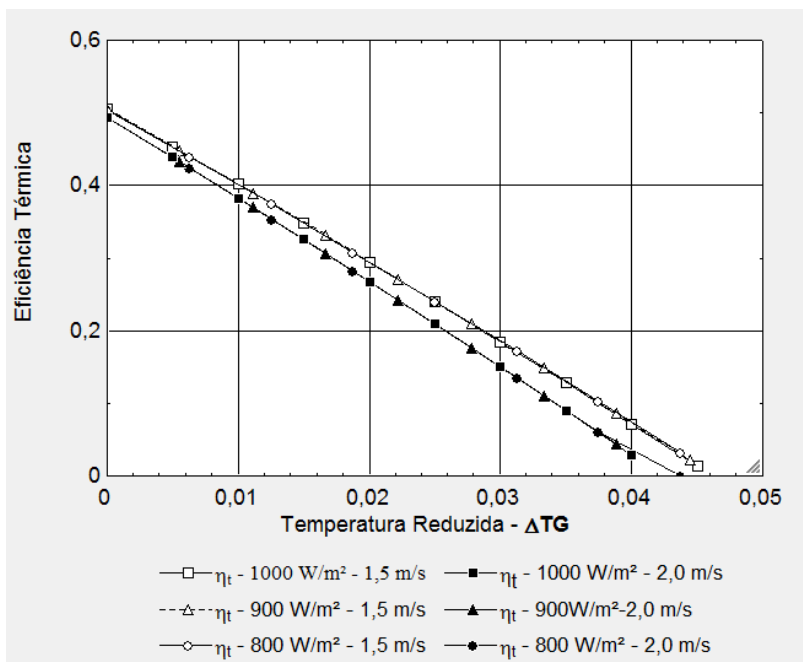


Figura 5 – Eficiência térmica em função da radiação solar e velocidade do vento.

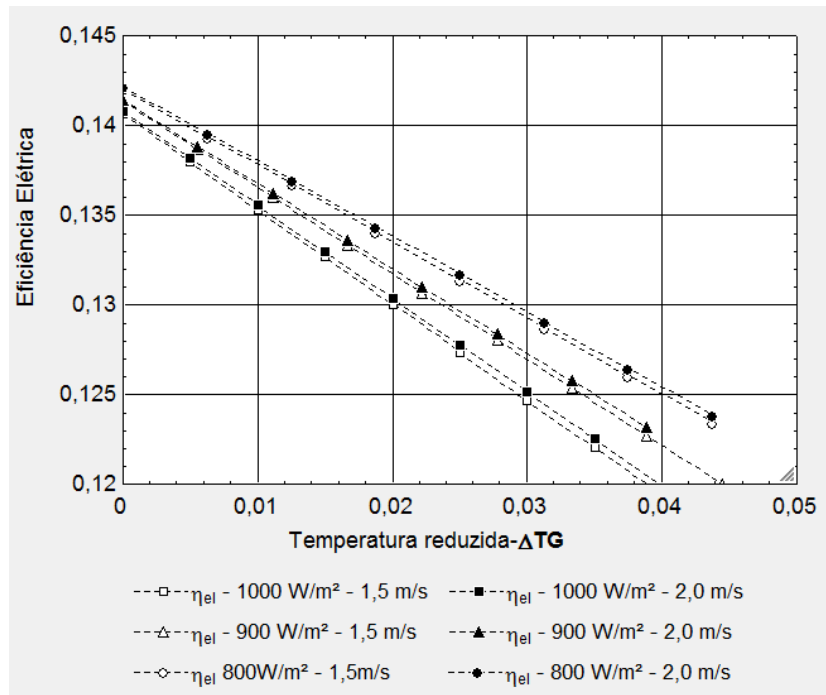


Figura 6 – Eficiência elétrica em função da irradiância e velocidade do vento.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como pode ser percebido através da Fig. 5 e Fig. 6 o aumento da velocidade do vento para uma incidência fixa de irradiância, gera uma redução na eficiência térmica do PV/T, já que as perdas térmicas pelo topo e também lateral e base tendem a aumentar, como foi observado por ZONDAG (2015). Entretanto, a eficiência elétrica apresenta um aumento, já que com maiores perdas de calor as células FV operam em temperaturas menores, permitindo uma produção maior de eletricidade.

Já o aumento da irradiância incidente sobre o PV/T para uma velocidade de vento constante, causa um aumento da eficiência térmica do PV/T e redução da eficiência elétrica. Pois, com maiores índices de irradiância as células FV atingem maiores temperaturas, geram menos energia elétrica e, portanto, mais calor fica disponível para ser transferido para a água. Dessa forma, se os respectivos conjuntos de pontos de cada condição avaliada, fossem reduzidos a uma reta, a inclinação das mesmas, para o caso da eficiência térmica, não alteraria com a variação da irradiância e sim com a variação da velocidade do vento. O mesmo não acontece com as retas que descrevem a eficiência elétrica, que além de ter os valores de eficiência reduzidos pelo aumento da radiação solar, também tem sua inclinação modificada com essa variação. Além disso, uma pequena variação na temperatura impacta muito mais a eficiência térmica do que a elétrica em qualquer uma das condições avaliadas. Dessa forma, um aumento, conjunto, da eficiência elétrica e térmica, geraria “conflitos”, pois, o aumento de uma, implicaria na redução inevitável da outra sendo que se fosse inserida outra cobertura de vidro sobre o PV/T, com o intuito de se criar um efeito estufa semelhante ao que acontece nos coletores solares planos, a eficiência térmica seria beneficiada em detrimento da eficiência elétrica.

Finalmente, também pode ser percebido a partir da Fig. 5 e Fig. 6 que, para se obter maior eficiência elétrica é interessante que a temperatura da água de entrada no PV/T seja baixa. Logo, em uma aplicação na qual exista um reservatório térmico para acumular água, a eficiência elétrica do PV/T, irá se reduzir ao longo do dia, caso não haja consumo. Dessa forma, fica claro que, o desempenho real de um PV/T é função da aplicação ao qual o mesmo se destina como destacado por SANDNES e REKSTAD (2002), onde o PV/T simulado apresentou ótimo desempenho em faixas de temperatura entre 20°C e 40°C.

5. CONCLUSÕES

Essas simulações iniciais permitiram observar o comportamento térmico e elétrico da tecnologia PV/T diante da variação de dois parâmetros climatológicos (irradiância e velocidade do vento), identificado que o uso da tecnologia PV/T deve ter como foco como por exemplo, em processos que demandem baixas temperaturas, como piso radiante para aquecimento de ambientes, que requerem além do calor, a eletricidade para movimentar as motobombas, que inclusive, poderiam ser de corrente contínua ou então, em processos de consumo constante de água quente onde água fria estaria fluindo constantemente pelo PV/T e assim, realizaria o pré-aquecimento da mesma para posteriormente ser aproveitada em coletores solares térmicos convencionais de forma a atingir temperaturas mais elevadas para um determinado processo.

Além disso, também ficou claro que o uso do PV/T é uma solução interessante principalmente por permitir a cogeração de energia elétrica e calor em um único espaço, o que é de grande valia para locais que necessitam de ambas as formas de energia e dispõem de pouca área ou possuem limitações de carga estrutural.

Por fim, é necessário que sejam construídos protótipos de PV/T, como o que foi gerado através dos subsídios teóricos deste trabalho, e conforme mostra a Fig.1, para que seja realizados ensaios/testes e assim, obter resultados reais do comportamento de um PV/T, atualmente em fase de teste, e validar os modelos teóricos podendo assim, difundir a tecnologia não somente para o mercado, mas também, com perspectivas de custos mais acessíveis, aos usuários finais.

Agradecimentos

Agradecemos a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), pelo apoio financeiro na elaboração dos protótipos de PV/T, ao Centro Federal de Tecnologia de Minas Gerais (CEFET) pela disponibilização do software Engineering Equation Solver (EES). E a Sollider Energia Solar, pelo apoio dado na concepção e construção dos protótipos de PV/T.

REFERÊNCIAS

- Chow, T.T.,2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, v.87, pp. 365-379.
- DAGHIGH, R. et al., 2011. Effect of Packing Factor on the Performance of PV/T Water Heater. In: International Conference on ENERGY & ENVIRONMENT, 6th., 2011, Cambridge. Recent Researches in Energy & Environment ... Cambridge: WSEAS Press, pp. 304-309. Disponível em < <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Cambridge/EE/EE-50.pdf> >.
- DUFFIE, John A., BECKMAN, William A. 2006. “Solar Engineering of Thermal Process” 2nd ed, John Wiley & Sons. Inc. Hoboken, New Jersey.
- Ferreira, André G. et al., 2014 Otimização da Eficiência Elétrica de Módulos Fotovoltaicos Através do Acoplamento de Trocadores de Calor Tipo Tubo-Aleta. In: VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL. Costa do Saúpe, Bahia.
- Koehn, R. K., Ondieki, H.O., Tonui, J.K., Rotich, S.K., 2012. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH, v. 1, n.11, pp. 2277-8616.
- Palla, Nansi et al.,2014. Development of Multivalent PV-Thermal Collectors for Cooling, Heating and Generation of Electricity. In: INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE, 30., 2014, Ahmedabad. Anais... Ahmedabad: CEPT University,pp. 16-18.
- Sandnes, Bjornar., Rekstad, Jhon. 2002. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy*, v.72, ed.1, pp. 63-70.
- Tripanagnostopoulos, Y.,2007. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, v. 81, p.1117-1131.
- Zilles, R.,2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, Oficina de textos - São Paulo.
- Zondag, H. A., 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- Zondag, H.A., Jong, M.J.M., Van Helden, W.G.J.,2015. Development and Applications for PV Thermal. Disponível em: < <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2001/rx01025.pdf>>. Acesso em : 25. Jul. 2015.

TERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A PHOTOVOLTAIC MODULE COUPLED WITH A FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

Abstract. *Approximately 15% of the incident solar radiation on photovoltaic modules (PV) poly-crystalline are converted into electric power, the rest of the solar energy is transformed into heat, and as a result, the panels are heated, causing a reduction in its electrical efficiency, which is proportional the temperature increase, and possible physical degradation of the photovoltaic cells over the years. Therefore, the increase in cell operating temperature is a side effect however, can be reduced with the integration of PV modules to one absorber plate like those used in flat solar collectors that will allow cogeneration of heat and electricity, preserving the physical integrity the photovoltaic cells from the same collecting area. Thus, this paper proposes a mathematical model to predict the behavior / thermal and electrical performance of a photovoltaic module coupled to a flat solar collector (Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector - PV / T) on a permanent basis from the variation of solar radiation and wind speed.*

Key words: *Co-generation, Solar Energy, PV/T.*