

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-TÉRMICO (PVT) PARA O SUL DA BAHIA

Vinícius de Oliveira Menezes Sirqueira (Uesc) - oliveirabrvinicius@gmail.com

Victor Santos Santana (UESC) - santanav589@gmail.com

Rafael Lúcio Negrão Cordeiro (UESC) - rafaellucionc@hotmail.com

Íngrid Heloisa da Silva Alves (UESC) - ihsalves@uesc.br

Resumo:

Sistemas fotovoltaicos-térmicos (PVT) conciliam a obtenção de energia elétrica, utilizando a tecnologia fotovoltaica, com a térmica em um só dispositivo. A energia térmica é obtida resfriando o painel fotovoltaico –empregando, por exemplo, um trocador de calor – e pode ser aproveitada de diversas formas, como aquecimento de ar, água ou de ambientes. O sul da Bahia é uma região que apresenta uma alta irradiação, similar ao restante do Nordeste, e por isso a energia solar tem ganhado espaço. Assim, esse trabalho tem o objetivo de obter uma configuração de um sistema PVT e sua modelagem matemática, que possibilite verificar a influência de parâmetros e que seja aplicável ao sul da Bahia para o atendimento de necessidades elétricas e térmicas. Para isso, levantou-se a composição de um sistema PVT que fosse possível de ser desenvolvido de forma simples e com menor custo, sendo selecionado o de chapa e tubos em um painel fotovoltaico plano. Com o levantamento bibliográfico e balanços de energia estabeleceu-se um modelo matemático simplificado da análise de aplicação do sistema. Os resultados obtidos com a modelagem matemática para influência de temperatura de entrada e vazão da água no trocador de calor foram comparados com os resultados simulados no COMSOL Multiphysics® utilizando os mesmos dados de entrada. O modelo matemático se mostrou coerente com a teoria, com a eficiência térmica aumentando e a temperatura da placa diminuindo à medida que diminui a temperatura de entrada da água ou aumenta sua vazão. Os resultados simulados endossaram os resultados analíticos, e ainda permitiu comparar a influência da orientação dos tubos do sistema PVT no desempenho, estando a orientação vertical com temperaturas desprezivelmente menores na placa do que a horizontal.

Palavras-chave: *Energia Solar, Sistemas PVT, Energia térmica*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *PVT- coletores e sistemas híbridos térmico fotovoltaicos: tecnologias e aplicações*

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-TÉRMICO (PVT) PARA O SUL DA BAHIA

Vinicius de Oliveira Menezes Sirqueira – oliveirabrvinicius@gmail.com

Victor dos Santos Santana – santanav589@gmail.com

Rafael Lúcio Negrão Cordeiro – rafaellucionc@hotmail.com

Íngrid Heloisa da Silva Alves – ihsalves@uesc.br

Universidade Estadual de Santa Cruz, Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas

Resumo. *Sistemas fotovoltaicos-térmicos (PVT) conciliam a obtenção de energia elétrica, utilizando a tecnologia fotovoltaica, com a térmica em um só dispositivo. A energia térmica é obtida resfriando o painel fotovoltaico – empregando, por exemplo, um trocador de calor – e pode ser aproveitada de diversas formas, como aquecimento de ar, água ou de ambientes. O sul da Bahia é uma região que apresenta uma alta irradiação, similar ao restante do Nordeste, e por isso a energia solar tem ganhado espaço. Assim, esse trabalho tem o objetivo de obter uma configuração de um sistema PVT e sua modelagem matemática, que possibilite verificar a influência de parâmetros e que seja aplicável ao sul da Bahia para o atendimento de necessidades elétricas e térmicas. Para isso, levantou-se a composição de um sistema PVT que fosse possível de ser desenvolvido de forma simples e com menor custo, sendo selecionado o de chapa e tubos em um painel fotovoltaico plano. Com o levantamento bibliográfico e balanços de energia estabeleceu-se um modelo matemático simplificado da análise de aplicação do sistema. Os resultados obtidos com a modelagem matemática para influência de temperatura de entrada e vazão da água no trocador de calor foram comparados com os resultados simulados no COMSOL Multiphysics® utilizando os mesmos dados de entrada. O modelo matemático se mostrou coerente com a teoria, com a eficiência térmica aumentando e a temperatura da placa diminuindo à medida que diminui a temperatura de entrada da água ou aumenta sua vazão. Os resultados simulados endossaram os resultados analíticos, e ainda permitiu comparar a influência da orientação dos tubos do sistema PVT no desempenho, estando a orientação vertical com temperaturas desprezivelmente menores na placa do que a horizontal.*

Palavras-chave: Energia Solar, Sistemas PVT, Energia térmica

1. INTRODUÇÃO

O aumento no crescimento populacional e na industrialização promoveram um aumento contínuo da demanda mundial de energia elétrica. No Brasil, o consumo de energia elétrica aumentou 1,1% no ano de 2018, em relação ao ano anterior, totalizando um consumo geral de 472242 GWh (EPE, 2019a). Nesse contexto, a Bahia apresentou um consumo médio anual de 2092692 MWh, ficando atrás apenas dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (EPE, 2019b).

Para atender a essa demanda, o país tem investido em uma estrutura energética diversificada, com ampliação reconhecível do uso de fontes renováveis. Isso permite a redução na emissão de poluentes decorrentes do uso de combustíveis fósseis, maior estabilidade no fornecimento de energia e redução de custos para consumidores. A energia solar tem se destacado nesse cenário, com as vantagens de ser gratuita, inesgotável e não poluente, além de poder ser aproveitada na forma de eletricidade – com sistemas fotovoltaicos – e calor – com coletores solares ou sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT) (CHOW, 2003; JIA, ALVA, FANG, 2019).

Os estados do Nordeste brasileiro possuem altos valores de potencial solar. O sul da Bahia apresenta uma irradiação média de até aproximadamente 231,48kWh/m² (DO BRASIL, 2000). Isso permite que a energia solar ganhe espaço, principalmente através da utilização de sistemas fotovoltaicos, apresentando a Bahia uma potência instalada de geração distribuída solar fotovoltaica de 6,8MW em 2018 (SAUAIA, 2019).

A utilização de sistemas PVT permite o aumento de eficiência dos painéis fotovoltaicos na conversão de energia solar para elétrica, além de otimizar a utilização da energia disponível, à medida que se aproveita também a energia térmica. Essa energia térmica pode ter diversas finalidades, como aquecimento de ar ou água, aquecimento de ambientes ou como calor de processo industrial. Nesses sistemas, os módulos fotovoltaicos são resfriados à medida que o calor é extraído (JIA, ALVA, FANG, 2019), geralmente utilizando trocadores de calor com água como fluido de trabalho, o que permite uma maior transferência de calor devido a maior capacidade térmica desse fluido (HERRANDO, MARKIDES, HELLGARDT, 2014).

O conceito de associação de energia fotovoltaica e térmica em sistemas PVT não é tão recente, tendo suas primeiras pesquisas desde a década de 70. Desde então, vários trabalhos têm sido desenvolvidos procurando a melhor configuração que promova os melhores resultados (JOSHI, DHOBLE, 2018). Porém, poucos são os sistemas PVT eficientes atualmente que estejam disponíveis no mercado (SHAN et al, 2014; JIA, ALVA, FANG, 2019).

Esse trabalho tem o objetivo de obter um modelo matemático que possa estimar parâmetros e verificar o desempenho de um sistema PVT, de modo a permitir o aproveitamento de energia térmica e elétrica. Utilizou-se a configuração chapa

e canais de tubos, ilustrado na Figura 1, devido ao menor custo inicial e de manutenção, construção simples, podendo ser facilmente implementado em um painel fotovoltaico plano sem necessitar de grandes adaptações (JIA, ALVA, FANG, 2019; BERGENE, LOVVIK, 2003; OOSHAKSARAEI et al, 2017).

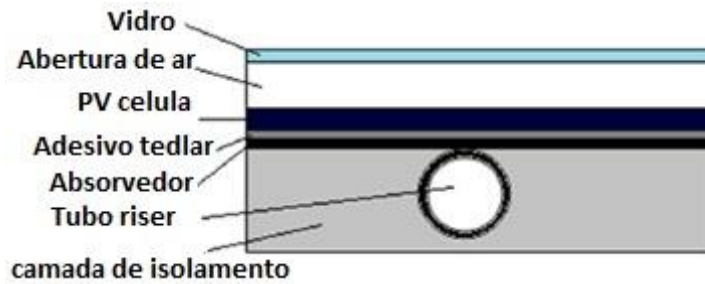


Figura 1: Composição do sistema PVT de análise.
Fonte: Adaptado de Herrando, Markides, Hellgardt, 2014

Além disso, optou-se por água como fluido térmico e por um coletor PVT coberto (com isolamento inferior), de forma a aproveitar a maior quantidade de energia térmica à medida que promove menores perdas térmicas ao meio externo. A variação de parâmetros de influência foi realizada com o objetivo de observar o desempenho teórico dentro do cenário residencial de obtenção de energia elétrica e água aquecida para o sul da Bahia.

2. METODOLOGIA

Esse trabalho teve o objetivo de levantar e aplicar a modelagem matemática de sistemas PVT com configuração adequada que possibilitasse a obtenção de energia térmica e elétrica utilizando materiais de baixo custo e fácil aplicação, buscando considerar a realidade do sul da Bahia. A pesquisa foi baseada na literatura técnica relacionada e a modelagem matemática foi obtida e aplicada utilizando a linguagem de programação Python e R. Posteriormente, foi realizada uma simulação computacional utilizando o COMSOL Multiphysics® com os mesmos dados de entrada, de forma a comparar com a simulação analítica realizada.

Foi utilizado um painel fotovoltaico comercial como base para análise. O painel utilizado foi o Sinosola SA330-72P (330Wp). Sua especificação e parâmetros úteis estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do painel fotovoltaico analisado

Modelo	SA330-72P
Dimensões (mm)	1956x992x40
Peso (kg)	23,5
Vidro frontal	Vidro temperado, 3,2mm
Células	Células solares policristalinas
Encapsulamento da célula	EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate)
Folha traseira	Filme composto
Máxima potência – $P_{m\acute{a}x}$ (W)	330
Corrente de curto circuito – I_{SC} (A)	9,49
Tensão em máxima potência – V_{STC} (V)	37,72
Corrente em máxima potência – I_{STC} (A)	8,75
Eficiência do módulo (%)	17
Coeficiente de temperatura – γ_{PV} (%/°C)	-0.423
Temperatura de operação (°C)	-40 a +85°C

Fonte: Adaptado de Neosolar, 2019

O sistema PVT é composto por camadas de diferentes materiais, sendo a primeira de vidro. Essa camada tem o objetivo de proteger as células fotovoltaicas e é selecionado o vidro pois este transmite a maior parte da radiação solar incidente, sendo transparente ao comprimento de onda de importância. Além disso, restringe as perdas por convecção e radiação (ASTE, DEL PERO e LEONFORTE, 2014). De acordo com informações obtidas em Aste, Leonforte e Del Pero (2015), o vidro possui parâmetros médios de absorvidade (α_v) igual a 0,1; emissividade (ϵ_v) de 0,88 e transmitância (τ_v) de 0,822.

Após a camada de vidro tem um breve espaço preenchido com ar, com espessura estimada de 0,02m. Essa folga deve ser pequena o suficiente para aproveitar o isolamento térmico provocado pelo ar estagnado e impedir que ocorra convecção. Em seguida tem o laminado fotovoltaico, com as características com absorvidade (α_{PV}) de 0,9 (HERRANDO, MARKIDES, HELLGARDT, 2014) e emissividade (ϵ_{PV}) de 0,9 (ASTE, DEL PERO e LEONFORTE, 2014).

Abaixo do laminado fotovoltaico há um adesivo que o conecta com uma placa absorvedora que encaminha a energia térmica para tubos de mesmo material que a placa e posteriormente para a água que passa por dentro deles. A configuração selecionada foi de placa e tubos, com 10 tubos soldados em paralelo distribuídos uniformemente na chapa absorvedora. O material selecionado para a placa absorvedora e tubos foi o alumínio devido a seu baixo custo e sua boa condutividade térmica (k_{al}) igual a 222W/m.K (CENGEL, GHAJAR, 2009). Entre o painel e o absorvedor é ainda colocada uma camada de acetato de etileno-vinil (EVA) para promover melhor isolamento elétrico. Para conectar a parte fotovoltaica ao absorvedor é utilizada cola termocondutora.

Dentro dos tubos há um fluxo de água que entra com temperatura ambiente igual a 30°C para que possibilite a extração de calor da placa. Abaixo dos tubos e placa há uma camada de material isolante térmico para evitar perdas de calor para o ambiente externo, de forma que a maior parte do calor seja direcionado para água. Optou-se por um isolamento térmico com poliestireno extrudido, por ter boa capacidade de isolamento e baixo custo, além de ser resistente à água (SILVA, 2013).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Em cada camada do sistema PVT descrito na seção 2 foi realizado um balanço de energia considerando as principais influências da radiação, convecção e condução entre as camadas, o ambiente e a água. Isso permitiu o desenvolvimento de um modelo matemático que possibilita a análise teórica de viabilidade do sistema, mostrando a dependência de alguns parâmetros envolvidos. A modelagem matemática foi realizada com base nos trabalhos de Herrando, Markides e Hellgardt (2014), Aste, Leonforte e Del Pero (2015), Aste, Del Pero e Leonforte (2014), Ribeiro (2016), Costa, Rocha e Faria (2017), Procópio et al (2016a), Procópio et al (2016b), e foram estabelecidas algumas considerações:

- A energia incidente no sistema que não é cedida ao ambiente externo ou convertida em eletricidade é absorvida pelo trocador de calor;
- A resistência térmica de contato entre as células fotovoltaicas e placa absorvente é desprezada;
- As perdas de calor pelas laterais do sistema são desprezadas;
- As perdas menores são desprezadas;
- As propriedades térmicas são constantes;
- O sistema funciona em regime permanente;
- O isolante térmico tem isolamento perfeito;
- A área da placa absorvedora é igual a área do painel fotovoltaico.

3.1. Balanço de energia na camada de vidro

Ao realizar o levantamento das energias envolvidas na camada de vidro, tem-se que a radiação absorvida é cedida por radiação à camada da célula fotovoltaica, por convecção e radiação ao ambiente externo e por condução para a camada de ar interna, como definido na Equação 1 e 2.

$$\dot{Q}_{rad,absv} = \dot{Q}_{comb,ext} + \dot{Q}_{cond,ar} + \dot{Q}_{rad,pv} \quad (1)$$

$$I_s \times A_s \times \alpha_v = h_{comb,ext} A_s (T_v - T_{me}) + \frac{k_{ar} A_s}{e_{ar}} (T_{pv} - T_v) + h_{rad,v-pv} A_s (T_v - T_{pv}) \quad (2)$$

Onde $\dot{Q}_{rad,absv}$ é a taxa de calor absorvida pelo vidro por radiação, $\dot{Q}_{comb,ext}$ é a taxa de transferência de calor combinada para o ambiente externo por radiação e convecção, $\dot{Q}_{cond,ar}$ é a taxa de transferência de calor por condução para o ar confinado dentro do sistema e $\dot{Q}_{rad,pv}$ é a taxa de calor transferida por radiação ao painel fotovoltaico. O termo I_s é a irradiação solar no coletor (W/m²), A_s é a área de superfície no coletor (m²), α_v é a absorvidade da camada de vidro, $h_{comb,ext}$ é o coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação ao meio ambiente (W/m²K), T_v a temperatura da camada de vidro (K), T_{me} temperatura do meio externo (K), k_{ar} é a condutividade térmica da camada de ar (W/mK), e_{ar} é a espessura da camada de ar (m), T_{pv} é a temperatura média da célula fotovoltaica (K), e $h_{rad,v-pv}$ é o coeficiente de troca de calor por radiação entre o vidro e a célula fotovoltaica (W/m²K).

O coeficiente de transferência de calor combinado no meio externo é resultado da combinação da radiação (h_{rad}) e convecção (h_{conv}), como apresentado na Equação 3 (CENGEL, GHAJAR, 2009).

$$h_{comb,ext} = h_{conv} + h_{rad} \quad (3)$$

Em que o coeficiente de convecção externo é determinado, de acordo com Watmuff et al (1977), com a Equação 4, em que V_{vento} é a velocidade do vento na localidade em m/s.

$$h_{conv} = 2,8 + 3 \times V_{vento} \quad (4)$$

Enquanto o coeficiente de troca de calor por radiação externa é dado pela Equação 5.

$$h_{rad} = F \times 4 \times \varepsilon_v \times \sigma \times T_{v-c\u00e9u}^3 \quad (5)$$

Onde F é o fator de forma entre o coletor e o céu, ε_v é a emissividade do vidro, σ é a constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) e $T_{v-c\u00e9u}$ é a temperatura média entre a camada de vidro e o céu (K), determinado de acordo com a Equação 6.

$$T_{v-c\u00e9u} = \frac{T_v + T_{c\u00e9u}}{2} \quad (6)$$

Em que T_v é a temperatura da camada de vidro (K) e $T_{c\u00e9u}$ é a temperatura equivalente de radiação do céu (K), definida de acordo com a Equação 7 (Unsworth e Monteith, 1975), dependente da temperatura do ambiente externo T_{ae} (K) e o fator de cobertura por nuvens do céu N em oitavas.

$$T_{c\u00e9u} = 0,0552 \times T_{me}^{1,5} + 2,625 \times N \quad (7)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vidro e a camada fotovoltaica é dado pela Equação 8.

$$h_{rad,v-PV} = 4 \times \varepsilon_{v-PV} \times \sigma \times T_{ar}^3 \quad (8)$$

Onde ε_{v-PV} é a emissividade resultante entre o vidro e a camada fotovoltaica, dada pela Equação 9, em função da emissividade das células fotovoltaicas (ε_{PV}) e da camada de vidro (ε_v).

$$\varepsilon_{v-PV} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{PV}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (9)$$

Para calcular a temperatura da camada de ar interna utiliza-se a Equação 10.

$$T_{ar} = \frac{T_v + T_{PV}}{2} \quad (10)$$

3.2. Balanço de energia no laminado fotovoltaico

A energia que chega à camada fotovoltaica por radiação é convertida em energia elétrica, ou transferida por radiação a camada de vidro, ou por condução para o absorvedor e em seguida para a água ou perdida para a camada de ar interna, resultando no balanço de energia da Equação 11 e 12.

$$\dot{Q}_{rad,absPV} = \dot{E}_{elet} + \dot{Q}_{cond,ar} + \dot{Q}_{rad,v} + \dot{Q}_{term,abs} \quad (11)$$

$$I_s \times A_s \times \tau_{PV} \times \alpha_{PV} = I_s \times \tau_{PV} \times \alpha_{PV} \times A_s \times \eta_{elet,real} + \frac{k_{ar} A_s}{e_{ar}} (T_{PV} - T_v) + h_{rad,v-PV} A_s (T_{PV} - T_v) + h_a A_s (T_{PV} - T_{ma}) \quad (12)$$

Onde $\dot{Q}_{rad,absPV}$ é a taxa de calor absorvida por radiação na camada fotovoltaica, $\dot{E}_{elet}$ é a taxa de geração de energia elétrica, $\dot{Q}_{rad,v}$ é a taxa de transferência de calor por radiação para a camada de vidro, $\dot{Q}_{term,abs}$ é a taxa de calor que chega a água, α_{PV} é absorvidade e τ_{PV} é a transmitância solar do painel fotovoltaico, ambos da camada fotovoltaica, $\eta_{elet,real}$ representa a eficiência elétrica real do módulo fotovoltaico, h_a é o coeficiente de transferência de calor por convecção da água ($\text{W/m}^2 \text{ K}$), T_{ma} é a temperatura média da água (K), calculado pela Equação 13.

$$T_{ma} = \frac{T_{a,ent} + T_{a,sai}}{2} \quad (13)$$

Onde $T_{a,sai}$ é a temperatura da água de saída de trocador e $T_{a,ent}$ temperatura da água de entrada.

3.3. Balanço térmico na água

O balanço de energia na água do trocador de calor é como exposto na Equação 14, em que o calor transferido da camada fotovoltaica para a água é igual a variação de energia térmica da água à medida que passa pelo trocador de calor.

$$h_a A_s (T_{PV} - T_{ma}) = \dot{m} c_p (T_{a,sai} - T_{a,ent}) \quad (14)$$

Em que $\dot{m}$ é o fluxo de massa de água através do trocador de calor (kg/s), c_p é o calor específico da água (J/kgK).

3.4. Parâmetros de desempenho

O desempenho do sistema híbrido PVT pode ser estimado por diversas grandezas. A mais utilizada é a eficiência total que mede quanto da energia solar foi convertida em eletricidade e calor, de acordo com a Equação 15 (HEGAZY, 2000; ASTE, DEL PERO e LEONFORTE, 2014).

$$\eta_{tot} = \eta_{elet} + \eta_{term} \quad (15)$$

Onde η_{elet} é a eficiência elétrica e η_{term} a eficiência térmica e η_{tot} é a eficiência total.

A eficiência térmica pode ser estimada utilizando a Equação 16.

$$\eta_{term} = \frac{\dot{Q}_{term,abs}}{I_{s,STC} \times A_s} \quad (16)$$

Onde $\dot{Q}_{term,abs}$ é a taxa de calor coletada e $I_{s,STC}$ é a irradiação nas Condições de Teste Padrão (STC). A eficiência térmica real é medida de acordo com a Equação 17.

$$\eta_{term,real} = \frac{\dot{Q}_{term,abs}}{I_s \times A_s \times \tau_{PV} \times \alpha_{PV}} \quad (17)$$

A eficiência elétrica pode ser estimada pela Equação 18.

$$\eta_{elet} = \frac{P_{STC}}{I_{s,STC} \times A_s} \quad (18)$$

Onde P_{STC} é a potência nominal do módulo fotovoltaico nas Condições de Teste Padrão (STC) para a potência máxima.

De acordo com Aste, Del Pero e Leonforte (2014), nas Condições de Teste Padrão (temperatura de 25 °C, irradiância normal de 1000 W/m² e um espectro solar correspondente à Massa de Ar (AM) de 1,5) a eficiência nominal elétrica é medida. Porém, as condições reais de operação podem ser diferentes das condições padrão, sendo necessário estimar o valor real da eficiência $\eta_{elet,real}$ considerando a influência dos parâmetros reais, de acordo com a Equação 19.

$$\eta_{elet,real} = \eta_{elet} \times k_\gamma \times k_\theta \times k_\lambda \times k_g \quad (19)$$

Onde η_{elet} é a eficiência nominal do módulo fotovoltaico, k_γ é o fator de correção da temperatura do módulo de acordo com o coeficiente de temperatura na potência do módulo fotovoltaico (γ_{PV}), dado pela Equação 20.

$$k_\gamma = [1 - \gamma_{PV} \times (T_{PV} - 298,15)] \quad (20)$$

k_θ é o fator de correção da reflexão óptica, determinado de acordo com a Equação 21.

$$k_\theta = \frac{\tau_v}{\tau_n} \quad (21)$$

Em que τ_v é a transmitância solar em um ângulo específico de incidência e τ_n a incidência normal. O termo k_λ consiste no fator de correção do espectro. Em laminados fotovoltaicos, de acordo com Riordan e Hulstron (1990), pode ser determinado pela Equação 22 em função da Massa de Ar (AM).

$$k_\lambda = 1,0547 - 0,0214 \times AM - 0,0075 \times AM^2 + 0,0004 \times AM^3 \quad (22)$$

O termo k_g é o fator de correção da irradiância para levar em consideração as perdas decorrentes da variação da irradiância nos módulos. É considerado que o comportamento da irradiância baixa é compensada pelos momentos que ocorre uma maior irradiância (Belluardo et al., 2012).

2.4 Parâmetros locais e gerais

Para que a modelagem seja precisa para o local estudado, o sul da Bahia, são necessários alguns dados da região, expressos na Tabela 2.

Tabela 2: Condições climáticas e locais do sul da Bahia.

Velocidade do vento média (V_{vento})	2,5m/s
Temperatura ambiente média (T_{me})	30°C
Irradiação real (I_s)	231,48W/m ²
Nebulosidade (N)	1/8

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o método analítico, aplicando as equações obtidas com a modelagem matemática e mantendo a temperatura no painel fotovoltaico a 50°C (estabelecida como uma temperatura desejada), calculou-se um fluxo de 116,05W/m² à placa absorvedora, que posteriormente é direcionado para a água passando pelos canais de tubos com uma vazão mássica total de 0,0027 kg/s. Para a água entrando nos canais a 30°C (temperatura ambiente), a temperatura de saída com a remoção dessa quantidade de calor da placa absorvedora é de 50°C. Esses dados foram estimados buscando o melhor desempenho teórico, com eficiência térmica aproximada de 66,68% e elétrica de 15,67%, resultando em uma eficiência total de 82,35%.

Verificou-se a influência da vazão mássica da água no trocador de calor na temperatura da placa, obtendo o resultado exposto na Figura 2. Variou-se também a temperatura de entrada da água de alimentação dos tubos e a vazão mássica total para ver a influência no desempenho térmico, resultados expressos na Figura 3 e 4.

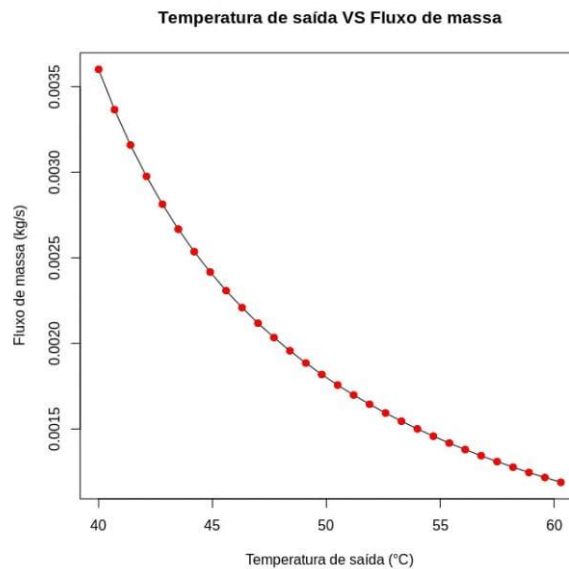


Figura 2: Influência da vazão mássica da água no trocador de calor na temperatura de saída.

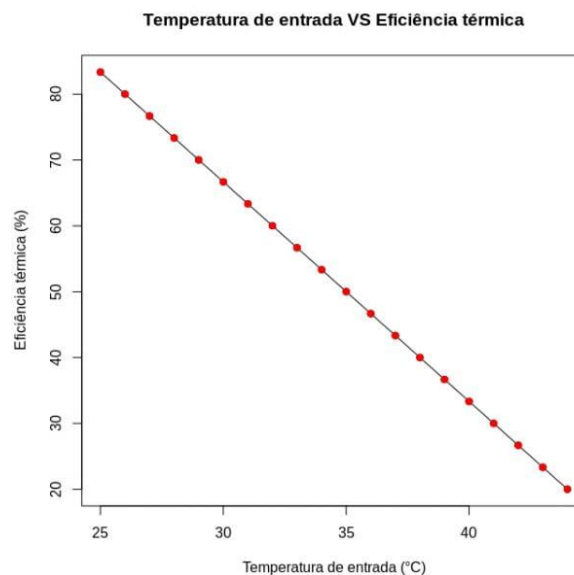


Figura 3: Influência da temperatura de entrada da água na eficiência térmica.

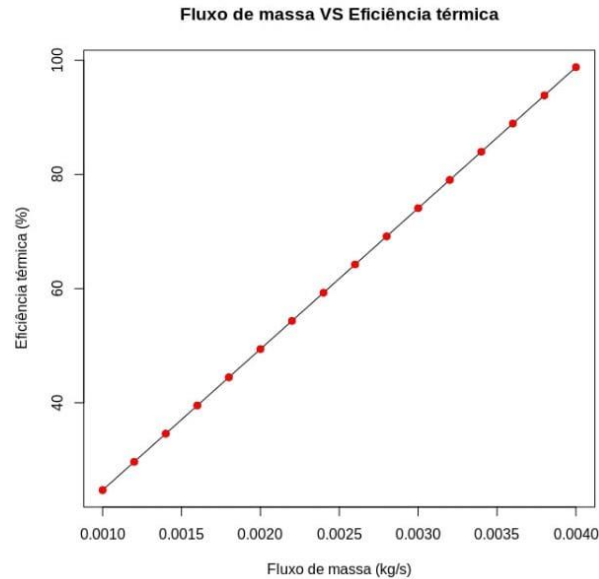


Figura 4: Influência da vazão mássica da água na eficiência térmica.

O modelo, apesar das considerações realizadas mencionadas no tópico 3, se mostrou coerente com a teoria. Ao se diminuir a temperatura da água de entrada no trocador de calor consegue-se uma maior diferença de temperatura entre a placa e a água, consequentemente mais energia térmica é transferida. Isso reflete na eficiência térmica demonstrada na Figura 3. Na Figura 4, pode-se observar que aumentando o fluxo de massa, aumenta-se a eficiência térmica, uma vez que mais calor é retirado da placa, resultado exibido pela Figura 2.

Os mesmos valores de fluxo de calor calculado para a placa absorvedora e parâmetros gerais, locais e dos materiais foram implementadas numa análise com o COMSOL Multiphysics® para comparar os resultados obtidos no modelo matemático. Verificou-se a influência da vazão mássica da água na temperatura da placa, apresentado na Figura 5. Comparou-se ainda a influência da disposição dos tubos em relação ao desempenho do resfriamento da placa, apresentado na mesma figura.

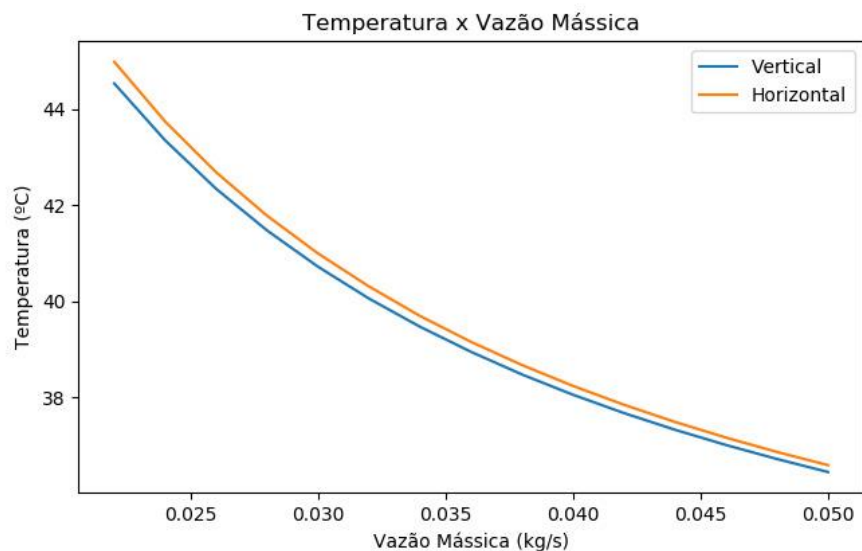


Figura 5: Influência da vazão mássica na temperatura da placa – resultado simulado.

A distribuição de temperatura de acordo com a configuração de tubos está descrita nas Figuras 6 e 7.

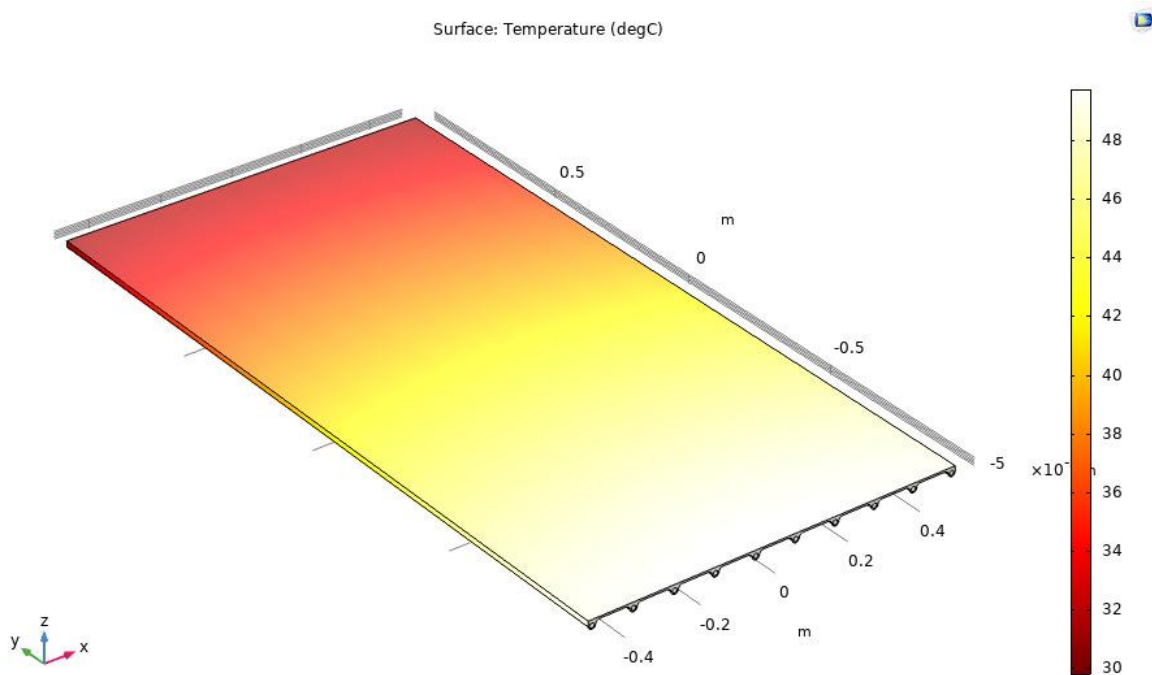


Figura 6: Distribuição de temperatura com tubos na vertical – resultado simulado.

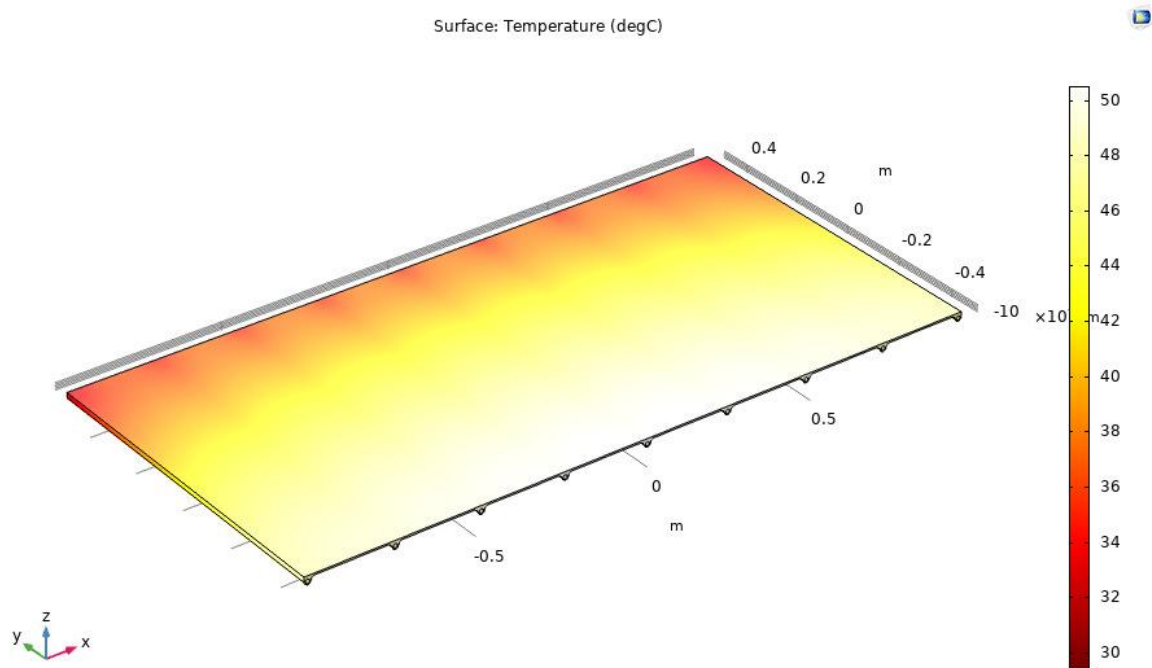


Figura 7: Distribuição de temperatura com tubos na horizontal – resultado simulado.

Percebeu-se que a influência da disposição dos tubos na placa influencia pouco o desempenho do sistema, porém a disposição de tubos na vertical resultou em temperaturas menores na placa, como pode ser observado pelas Figuras 5 e 6. Ou seja, consegue-se utilizar a configuração vertical com a chapa absorvedora atingindo no máximo a temperatura de 321,15K (ou 48°C). A Figura 5 se mostra similar a Figura 2 obtida com o modelo matemático, endossando assim seus resultados e viabilizando a utilização do modelo matemático para estimativa de parâmetros. As temperaturas obtidas na simulação para a placa estão próximas às do modelo matemático.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido um modelo matemático para verificar a influência de parâmetros no desempenho de um sistema PVT a ser aplicado no sul da Bahia para aproveitamento elétrico e térmico. Percebeu-se que o modelo obtido, apesar das considerações utilizadas para viabilizar a análise, se mostrou coerente com a teoria. Este mostrou que à medida que a temperatura de entrada da água no trocador de calor diminui, a eficiência térmica aumenta, assim como ocorre quando se aumenta a vazão mássica da água. Isso porque essas alterações favorecem a retirada de calor da placa, diminuindo sua temperatura e aumentando a eficiência térmica.

A mesma análise foi realizada utilizando o COMSOL Multiphysics®, com os mesmos parâmetros de entrada. Os resultados obtidos com a simulação foram similares aos do modelo matemático, demonstrando a mesma influência entre a vazão mássica e a temperatura de entrada da água de resfriamento no desempenho. Com a simulação foi ainda verificada qual a melhor configuração da distribuição dos tubos no trocador de calor. Percebeu-se que isso pouco influencia no desempenho do sistema, porém o trocador de calor com os tubos na vertical promoveu menores temperaturas na placa, ressaltando que mais calor foi retirado. As temperaturas obtidas na simulação para a placa estão próximas as do modelo matemático.

Em trabalhos futuros outras análises mais precisas serão realizadas, reduzindo o número de considerações do modelo matemático tendo em vista obter uma análise mais próxima da realidade. O modelo matemático necessita ser aprimorado para que leve em consideração as perdas de calor nas laterais e pelo isolante térmico. A análise se limitou ao sistema PVT. O sistema de alimentação de água e de consumo devem ser dimensionados. Análises experimentais devem ser realizadas após a aquisição do painel fotovoltaico e adaptação com um sistema térmico, para assim comparar com os resultados analíticos e simulados.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Estadual de Santa Cruz pelo apoio e fornecimento do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- Aste, Niccol, Del Pero, Claudio, Leonforte, Fabrizio, (2014). Water flat plate PV–thermal collectors: a review. *Solar Energy*, v. 102, p. 98-115.
- Aste, Niccol, Leonforte, Fabrizio, del Pero, Claudio, (2015). Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaicthermal (PVT) water collector. *Solar Energy*, v. 112, p. 85-99.
- AWS Truepower, Camargo Schubert Engenheiros Associados, FIEB/SENAI CIMATEC, (2018). Atlas solar: Bahia. Curitiba: Camargo Schubert; Salvador: SECTI: SEINFRA: CIMATEC/SENAI. 76 p.
- Belluardo, G., Pichler, M., Moser, D., Nikolaeva-Dimitrova, M. (2012). One-year comparison of different thin film technologies at Bolzano Airport Test Installation. In: Mendez-Vilas, A. (Ed.), *Fuelling the Future: Advances in Science and Technologies for Energy Generation, Transmission and Storage*. Brown Walker Press, Boca Raton, FL.
- Bergene T, Iovvik om (2003). Model calculations on a flatplate solar heat collector with integrated solar cells. *Sol Energy*. 2003
- Cengel, Yunus A. (2009); ghajar, Afshin J. *Transferência de Calor e Massa*. Amgh Editora.
- Chow TT., (2003) Performance analysis of photovoltaicthermal collector by explicit dynamic model. *Sol Energy* 2003;75:14352.
- Costa, Rocha e Faria (2017), Avaliação Analítica das Eficiências Térmicas e Elétricas de um Módulo Fotovoltaico Acoplado a um Coletor Solar de Placa Plana.
- do Brasil, A. S. (2000). banco de dados solarimétricos/coordenador Chigueru Tiba... et al. Recife: Ed. Universitária da UFPE.
- Empresa de pesquisa energética. Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional). (2018). Disponível em: < [http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional)) > . Acesso em 6 maio 2019a.
- Empresa de pesquisa energética. Consumo mensal de energia elétrica por classe regiões e subsistemas. (2018). Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas> > . Acesso em 6 maio 2019b.
- Hegazy, A.A., (2000). Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Convers. Manage.*

- Herrando, Mara; markides, Christos N.; Hellgardt, Klaus. (2014) A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Applied Energy*, v. 122, p. 288-309, 2014.
- Jia, Yuting; Alva, Guruprasad; fang, Guiyin. (2019) Development and applications of photovoltaic thermal systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 102, p. 249-265, 2019.
- Joshi, Sandeep S.; Dhoble, Ashwinkumar S. (2018) Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, p. 848-882, 2018.
- Neosolar. Painel Solar Fotovoltaico Sinosola SA330-72P (330Wp) Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-sinosola-sa330-72p-330wp.html>>. Acesso em 10 nov 2019.
- Ooshaksaraei P, Sopian K, Zaidi SH, Zulkifli R. (2017) Performance of four air based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells. *Renew Energy* 2017;102:27993.
- Procópio et al. (2016), ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ELÉTRICO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO ACOMPLADO A UM COLETOR SOLAR PLANO, VI Congresso Brasileiro de Energia Solar Belo Horizonte, 04 a 07 de abril de 2016
- Procópio, Othon Lucas et al. (2016) Modelo analítico do comportamento térmico e elétrico de um módulo PV/T e sua avaliação pela primeira lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 7, n. 1, p. 74-82, 2016a.
- Ribeiro, Nadja Cardoso Campos. (2016) Análise de sistema híbrido solar: fotovoltaico e térmico. 2016.
- Riordan, C., Hulstron, R., (1990). What is an air mass 1.5 spectrum? [solar cell performance calculations], pp. 1085-1088.
- Sauaia, R. L. (2018) Geração distribuída solar fotovoltaica: benefícios líquidos ao Brasil. Seminário internacional de micro e mini geração distribuída aneel. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/16832773/4+%20+ABSOLAR+GD+Solar+Fotovoltaica.pdf/f0d41ea4-4bba-8cf8-fb02-b864dc83c293>>. Acesso em 6 maio 2019.
- Shan, Feng et al. (2014) Performance evaluations and applications of photovoltaic thermal collectors and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 33, p. 467-483, 2014.
- Silva, Filipe Manuel Fernandes. (2013) Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores.
- Unsworth, M.H., Monteith, J., (1975). Long-wave radiation at the ground I. Angular distribution of incoming radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 101, 1324.
- Watmuff, J., Charters, W., Proctor, D., (1977). Solar and wind induced external coefficients-solar collectors. *Cooperation Mediterr. Energie Sol.* 1, 56.

MODELING AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC-THERMAL HYBRID SYSTEM (PVT) FOR SOUTH BAHIA

Abstract. Photovoltaic-thermal (PVT) systems reconcile the obtaining of electricity using photovoltaic technology with thermal in one device. Thermal energy is obtained by cooling the photovoltaic panel - using, for example, a heat exchanger - and can be applied in a variety of ways, such as air, water or room heating. Southern Bahia is a region that has a high irradiation, similar to the rest of the Northeast, and for this reason solar energy has gained space. Thus, this work aims to obtain a configuration of a PVT system and its mathematical modeling, which makes it possible to verify the influence of parameters and which is applicable to southern Bahia to meet electrical and thermal needs. For this, the composition of a PVT system that could be developed simply and at a lower cost was raised, being selected the plate and tubes in a flat photovoltaic panel. With the bibliographic survey and energy balances a simplified mathematical model of the system application analysis was established. The results obtained with the mathematical modeling for influence of inlet temperature and water flow in the heat exchanger were compared with the simulated results in COMSOL Multiphysics® using the same input data. The mathematical model proved to be consistent with the theory, with thermal efficiency increasing and plate temperature decreasing as water inlet temperature decreases or flow rate increases. The simulated results endorsed the analytical results, and also allowed to compare the influence of PVT tube orientation on performance, with the vertical orientation having negligibly lower plate temperatures than the horizontal one.

Key words: Solar Energy, PVT Systems, Thermal Energy