

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM COLETOR SOLAR HÍBRIDO DE PLACA PLANA (PV-T) PARA A PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE E ÁGUA QUENTE

Fúlvio Aron Góes Silva – fulvioaron@hotmail.com

Frederico Romagnoli Silveira Lima – fredrsl@des.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. No presente trabalho apresenta-se um modelo numérico computacional com base em um protótipo de coletor solar PV-T (painel fotovoltaico-térmico) desenvolvido experimentalmente como objeto de estudo de uma dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia do CEFET-MG. Nesse coletor, uma parcela da radiação solar é convertida em eletricidade por meio das células fotovoltaicas e simultaneamente também é realizado o aproveitamento da energia térmica para o aquecimento de água. O modelo numérico bidimensional implementado e simulado usando-se o software COMSOL Multiphysics 4.4. Os resultados numéricos da temperatura de saída e da vazão mássica foram comparados aos valores experimentais, verificando-se uma variação percentual média de 4%, validando-se assim o modelo numérico. Com base nos valores numéricos foi também calculada a eficiência térmica coletor solar PV-T e comparada aos resultados experimentais. A eficiência do módulo elétrico do coletor, foi obtida de modo indireto a partir da influência térmica sobre os módulos fotovoltaicos. Um estudo paramétrico da influência da geometria do canal de circulação de água sobre a eficiência térmica do coletor é também apresentado, e foi verificado que para uma altura do canal de circulação de água igual a 2,75 milímetros, a eficiência térmica apresenta um ganho de aproximadamente 1,96% em relação aos resultados experimentais, e a eficiência elétrica do modelo apresenta um decréscimo de 0,48% comparada aos dados experimentais.

Palavras-chave: Coletor solar PV-T; simulação numérica; COMSOL Multiphysics.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar pode ser dita como a mais importante fonte de energia presente na Terra, diante do fato que basicamente todas as formas de energias que se conhecem - hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos - são formas indiretas da energia solar e por ela ser responsável pela manutenção da vida terrestre. Estima-se (Rodrigues, 2008) que o valor anual da quantidade de energia proveniente do sol e que intercepta a superfície terrestre, equivale a 160 vezes a energia armazenada nas reservas de combustíveis fósseis, e a 15000 vezes o consumo anual de energias provenientes de combustíveis fósseis, nucleares e hidroelétricas.

O Brasil apresenta uma extensa área com índices de radiação propícios para o aproveitamento da energia solar e os coletores solares de baixa temperatura (até 80°C) são favoráveis à aplicação do aquecimento da água para banho, substituindo adequadamente o chuveiro elétrico. Segundo Agência Brasil (2015), a conversão da energia solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos apresenta uma parcela ainda menor do aproveitamento solar. Dos sistemas de geração distribuída conectados à rede elétrica, somente 500 são projetos de energia solar fotovoltaica.

O coletor solar PV-T (painel fotovoltaico-térmico) atua como um instrumento importante para a utilização da energia radiante do sol, tanto na forma de calor, quanto na forma luminosa. Este equipamento é composto pela integração de um módulo fotovoltaico em um coletor solar térmico. A união destes dois sistemas permite que a energia radiante do sol seja transformada nas formas térmica e elétrica, além de possuir um aspecto construtivo que reduz o custo e área de alocação, comparados a estes sistemas trabalhando separadamente.

Touafek *et al.* (2011) destacam que através desta integração, o módulo fotovoltaico apresenta um melhor desempenho elétrico, pois trabalha a uma menor temperatura e a energia térmica absorvida é doada a um fluido de trabalho. Porém, neste sistema a energia térmica absorvida é menor que de um sistema único de absorção de energia térmica.

No presente trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um modelo térmico de um coletor solar PV-T para a simulação do comportamento térmico e fluidodinâmico deste sistema operando por meio do efeito de termossifão. Os parâmetros dimensionais e de funcionamento foram baseadas em um protótipo experimental do coletor que foi objeto de estudo para a elaboração de uma dissertação de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia do CEFET-MG (Viana, 2014).

2. CARACTERÍSTICAS DO COLETOR SOLAR PV-T

O coletor solar PV-T estudado neste trabalho utiliza água como fluido de trabalho que circula através da placa absorvedora. A circulação da água neste sistema ocorre através da circulação natural retirando calor do módulo fotovoltaico, permitindo a melhor eficiência térmica deste. Na Fig. 1 pode ser visto o esquema de um coletor solar PV-T que utiliza água como fluido de trabalho.

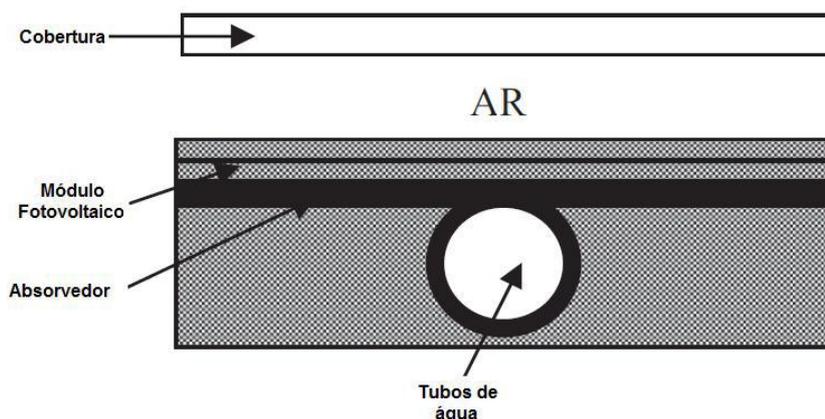


Figura 1 – Representação esquemática do coletor solar PVT – Água (Viana, 2014).

A circulação natural da água no coletor solar é devido ao efeito termossifão provocado pela ação da força da gravidade associada aos gradientes de temperatura. Este fenômeno é possível, pois quando o fluido de trabalho é submetido a um gradiente de temperatura sua densidade muda formando as correntes de convecção, no qual as partes mais quentes do fluido e por consequência menos densas tendem a subir e as partes mais frias do fluido tendem a descer.

Uhlemann e Bansal (1985) descrevem que o escoamento do fluido através do efeito termossifão, pode ser explicado por meio da diferença de pressão ao longo do circuito do coletor solar e que por sua vez é uma função da massa específica do fluido conforme descrito na Eq. (1).

$$\Delta p/l = (\rho_i - \rho_0)g \quad (1)$$

No coletor solar PV-T o calor absorvido pelo módulo fotovoltaico é retirado através do fluido reduzindo a temperatura do módulo. A redução da temperatura do módulo fotovoltaico tem uma atuação positiva em seu rendimento elétrico, conforme descrito em CRESEB/CEPEL (2014). Nesse caso, a diminuição da temperatura implica em uma elevação da tensão com pequeno decréscimo da corrente, como mostrado na Fig. 2.

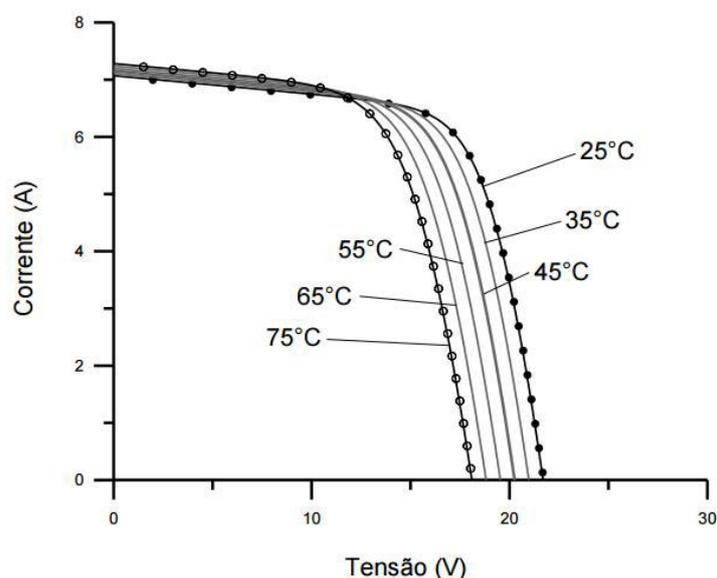


Figura 2 – Influência da temperatura do módulo fotovoltaico (CRESEB/CEPEL, 2014).

A partir deste fenômeno é possível notar que o módulo fotovoltaico apresenta uma melhor eficiência elétrica quando integrado ao coletor solar térmico quando comparado ao seu funcionamento de forma isolada. Em seu trabalho, Guo et al., (2015) demonstraram que a eficiência elétrica alcançada em um coletor solar PV-T com água como fluido circulante, apresenta um ganho de aproximadamente 6% em relação ao módulo fotovoltaico isolado.

Contudo, de acordo com Touafek et al. (2011), neste sistema a energia térmica absorvida é menor que de um sistema único de absorção de energia térmica, pois o incremento do módulo fotovoltaico implica em um aumento da resistência térmica entre a superfície de captação solar e a superfície em contato com a água.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO TÉRMICO

Para o desenvolvimento de um modelo numérico computacional confiável foram adotados alguns procedimentos e considerações.

Modelo experimental do coletor solar PV-T

O modelo numérico computacional proposto foi baseado em um modelo experimental de um coletor solar PV-T, Fig. 3, desenvolvido por Viana (2014). Na medição da radiação solar global incidente no plano de abertura do coletor PV-T foi utilizado um piranômetro modelo CPM21 (Kipp & Zonen) seguindo os procedimentos descritos em Duffie e Beckman (2006).



Figura 3 – Modelo experimental do coletor solar PV-T (Viana, 2014).

Dados para simulação numérica e validação do modelo térmico

Alguns dados necessários à simulação do modelo não estavam explícitos no trabalho proposto por Viana (2014), havendo a necessidade de calcular alguns parâmetros. A temperatura de entrada e saída do fluido circulante sob a seção intermediária do coletor solar PV-T e a vazão mássica do fluido foram importantes parâmetros estimados indiretamente por meio dos dados conhecidos do experimento do coletor.

As medições das temperaturas, durante o experimento de Viana (2014), foram realizadas a cada intervalo de hora durante os quatro dias do experimento, sendo realizadas em cinco pontos de medição sob a parte inferior da placa absorvedora. A posição dos sensores de temperatura é mostrada na Fig. 4.

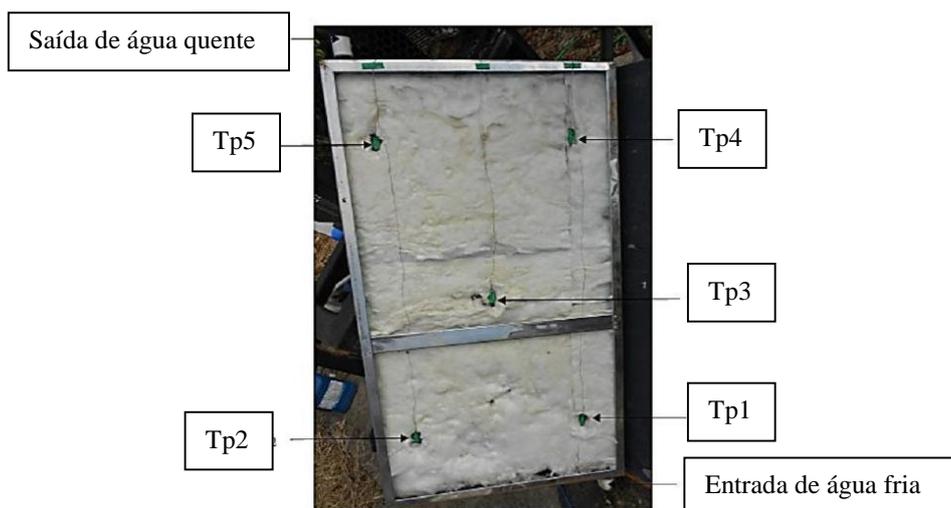


Figura 4 – Posição dos sensores de temperatura (Viana, 2014).

Os sensores de temperatura Tp1 e Tp2 estão localizados na extremidade inferior do coletor à aproximadamente 0,12 m do canal de distribuição de água fria, assim como os sensores Tp4 e Tp5 estão localizados à 0,12 m do canal de distribuição de água quente.

De acordo com Jones e Lior (1994) o escoamento do fluido nos tubos de elevação da placa absorvedora apresenta um perfil de distribuição crescente e proporcional das vazões e a distribuição de temperatura ao longo do coletor é diretamente proporcional a vazão do fluido. Deste modo, pôde-se obter as temperaturas médias da parte inferior e superior

do coletor solar situadas à 0,12 m das extremidades, como sendo a médias das temperaturas apontadas para os sensores Tp1 e Tp2 e dos sensores Tp4 e Tp5. E ainda, segundo Ong (1974) as distribuições de temperatura ao longo do tubo de elevação do coletor apresentam um padrão crescente e proporcional. Sendo assim, foi possível obter o gradiente de temperaturas para a porção intermediária do coletor e desta forma determinar as temperaturas estimadas para a porção inicial e final desse trecho. Estas temperaturas foram assumidas como sendo a temperatura de entrada e saída do fluido circulante sob a seção intermediária do coletor. A vazão mássica de água também foi obtida para cada intervalo de medições do experimento. A sua determinação foi realizada a partir de um balanço energia no coletor solar, considerado sob um regime quase-estático. O balanço de energia é descrito na Eq. (2).

$$Q_{\text{útil}} = Q_{V.C} + W_{\text{ele}} + \Delta E_{V.C} \quad (2)$$

Onde,

$Q_{\text{útil}}$, é o calor útil ganho pela água ao passar pelo coletor no intervalo de uma hora;

$Q_{V.C}$, é o calor transferido do coletor para o ar ambiente no intervalo de uma hora;

W_{ele} , energia elétrica que sai do coletor no intervalo de uma hora;

$\Delta E_{V.C}$, energia acumulada ou desacomulada do coletor no intervalo de uma hora.

A variável $Q_{\text{útil}}$ representa o ganho de energia pela água em um intervalo de uma hora, pôde-se representar na forma temporal a quantidade de calor doado a água e desta forma obter a vazão mássica de água. Estes dois parâmetros foram utilizados para validar o modelo numérico do coletor, pois descrevem comportamento térmico e fluidodinâmico deste sistema.

Simulação do modelo térmico

A simulação numérica foi feita por meio do uso do *software* COMSOL *Multiphysics 4.4*, o qual utiliza o método de elementos finitos para resolução das equações diferenciais associadas ao problema físico. No desenvolvimento da geometria do modelo numérico foi feita a análise na placa absorvedora do modelo experimental, pois é a região responsável por permitir a transferência de calor através do contato direto com o fluido em escoamento. Ela é composta por 22 canais retangulares ao longo de sua estrutura apresentando cada um deles 15 mm de largura, 3 mm de altura e com espaçamento 30 mm entre os centros de cada canal. O perfil da placa absorvedora é apresentado na Fig. 5.

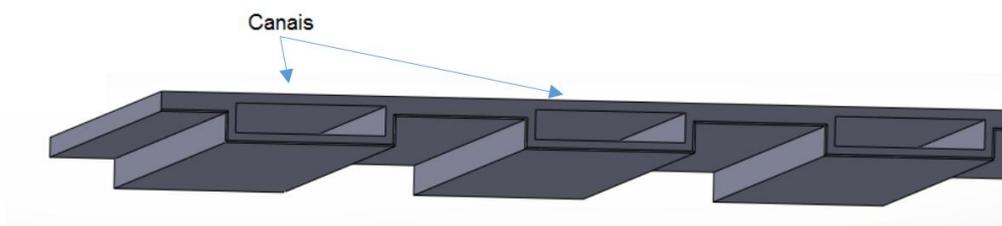


Figura 5 – Perfil da placa absorvedora.

De forma a facilitar a solução numérica foram feitas simplificações na geometria da placa absorvedora. A primeira consideração adotada foi representar o modelo do coletor somente por sua porção intermediária, com um único canal e uma porção simétrica da placa absorvedora em ambos lados do canal. O modelo simplificado pode ser visualizado na Fig. 6.

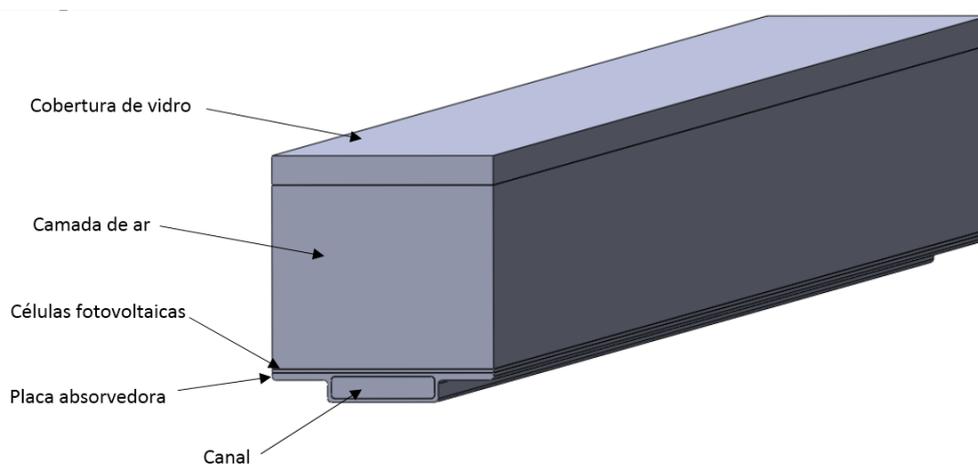


Figura 6 – Modelo tridimensional simplificado.

A partir desta geometria proposta e desconsiderando os efeitos de trocas térmicas na lateral do coletor (superfície isolada termicamente), pode-se desenvolver um modelo bidimensional para o estudo numérico. Este modelo 2D representa as trocas térmicas no perfil longitudinal do modelo tridimensional simplificado do coletor solar “PV-T” e os valores médios de temperatura e vazão deste (KIKAS, 1995). A análise deste modelo proposto reduz o número de elementos utilizados na malha, melhorando a estabilidade da solução. A porção inicial do modelo bidimensional é representado na Fig. 7.

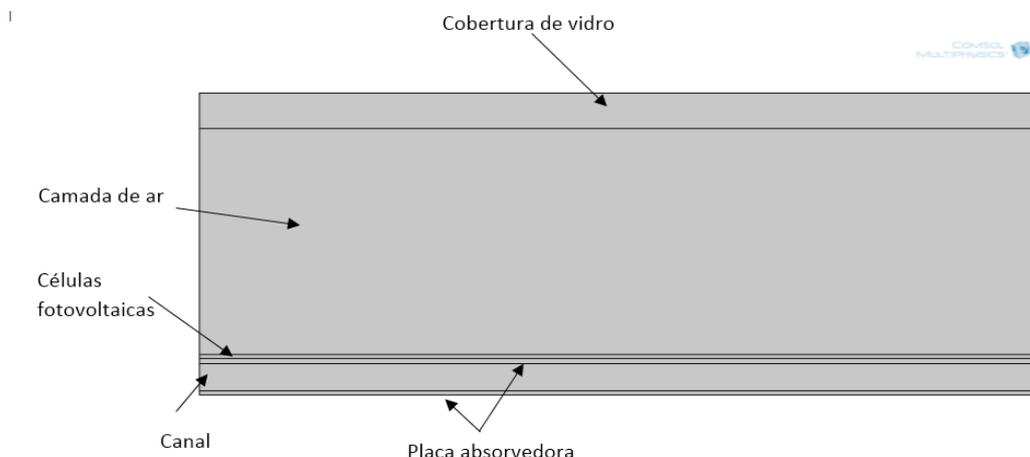


Figura 7 – Modelo numérico bidimensional.

Este modelo representa a porção intermediária do modelo tridimensional simplificado e possui um canal de circulação de água com a mesma altura (3 mm) do modelo experimental.

Na análise térmica do modelo bidimensional foi considerado que o calor incidente na cobertura equivale ao produto da irradiação solar e absorvidade do vidro ($\dot{I}_{solar} \cdot \bar{\alpha}_{cobertura}$) e a parcela calor incidente no módulo FV equivale ao produto da irradiação solar combinado à transmissividade do vidro com a absorvidade do painel ($\dot{I}_{solar} \cdot \bar{\tau}_{vidro} \bar{\alpha}_{painel\ FV}$). A perda de calor com o ambiente foi devido ao calor emitido pela cobertura ao meio e a perda por convecção da cobertura com o ar. A representação da análise térmica é apresentada na Fig. 8.

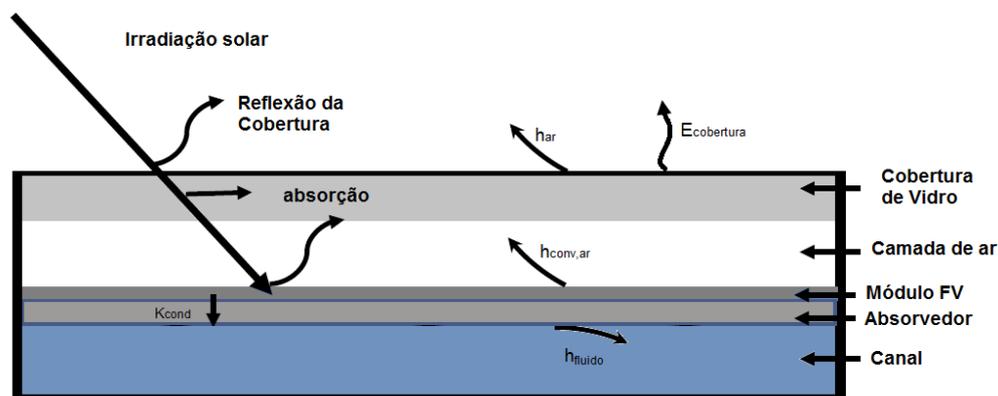


Figura 8 – Análise térmica do modelo.

O efeito termossifão, como dito anteriormente, é causado pela variação de densidade no próprio fluido, originando desta forma uma força de empuxo. Este efeito foi associado ao modelo numérico através do termo força de campo gravitacional por unidade de volume (F) da equação de Navier-Stokes. Para a implementação desta grandeza no software *COMSOL Multiphysics 4.4* foi utilizada a relação dada pela Eq. (3).

$$F = [-g \cdot \text{sen}(30^\circ)] \cdot (\rho_i - \rho_0) \quad (3)$$

Onde $[-g \cdot \text{sen}(30^\circ)]$ é a componente da aceleração gravitacional que atua sobre o fluido (30° representa a inclinação do coletor) e $(\rho_i - \rho_0)$, é a diferença da densidade local do fluido e da densidade do próprio fluido na entrada do canal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do modelo foram comparados os valores das temperaturas de saída do fluido e os valores de vazão mássica do modelo numérico com os resultados apresentados no trabalho de Viana (2014). As temperaturas de saída do fluido para cada condição de simulação geraram um comportamento com alto grau de aproximação em relação aos valores experimentais. O erro padrão dos valores foi de 2,19% e o erro máximo foi de 7,26%. O comportamento das temperaturas de saída do fluido para o modelo simulado e para o modelo experimental nos quatro dias de testes são apresentados na Fig. 9.

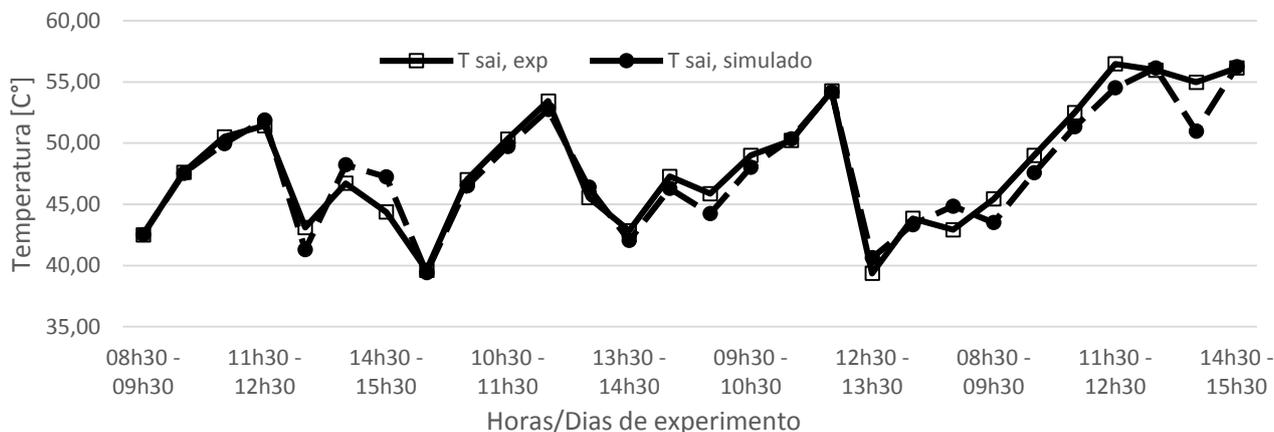


Figura 9 – Temperatura de saída do fluido no experimento e simulação

O comportamento da vazão mássica gerada a partir dos resultados do modelo numérico apresentou um grau de aproximação não muito satisfatório. Porém, seu comportamento seguiu as mesmas tendências do perfil experimental. Outro fator importante foi que, a vazão mássica média gerada pelo modelo numérico, igual a $7,54 \times 10^{-3}$ [kg/s], teve uma boa aproximação com a vazão mássica média obtida experimentalmente, que foi igual a $7,28 \times 10^{-3}$ [kg/s], apresentando um erro de 3,57%. Esse comportamento é apresentado na Fig. 10.

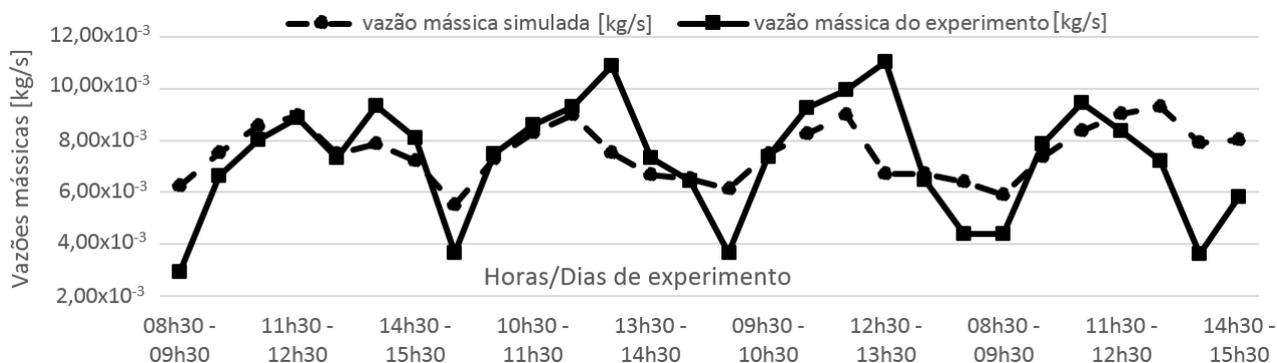


Figura 10 – Comportamento das vazões mássicas simuladas e experimental.

Com base nestes valores e nos valores de irradiação solar conhecidos para os quatro dias de testes foi determinado a eficiência térmica para o modelo numérico do coletor, que foi de 47,3% enquanto que a eficiência térmica para o modelo experimental foi de 49,7%. A eficiência elétrica do modelo numérico foi calculada através da correlação com a influência da temperatura na das células fotovoltaicas o valor obtido foi de 10,2%, enquanto que o modelo experimental alcançou uma eficiência elétrica de 11%. Com base nos resultados obtidos, o modelo numérico pôde ser validado, pois apresentou uma boa aproximação do valor experimental e representou muito bem o comportamento térmico e fluidodinâmico.

A partir do modelo numérico validado pôde ser feito um estudo da espessura do canal de circulação de água. Por meio deste estudo foi possível analisar a influência da altura na eficiência térmica e elétrica do coletor visando melhorá-lo. Foram estudadas 8 novas geometrias do coletor, com alturas dos dutos menores e maiores que a altura original de 3 mm ($e=3$). Os valores escolhidos de espessuras variaram entre 2 mm ($e=2$) e 4 mm ($e=4$) com um intervalo de 0,25 mm. Para cada uma das geometrias foram assumidas as mesmas condições implementadas ao software. Primeiramente foi analisado o comportamento das temperaturas de saída do fluido para cada uma das 8 geometrias dos modelos para o qual observa-se que a medida que aumenta-se a espessura do duto de elevação do modelo, as temperaturas de saída do fluido ficam cada vez menores. Este comportamento é apresentado na Fig. 11.

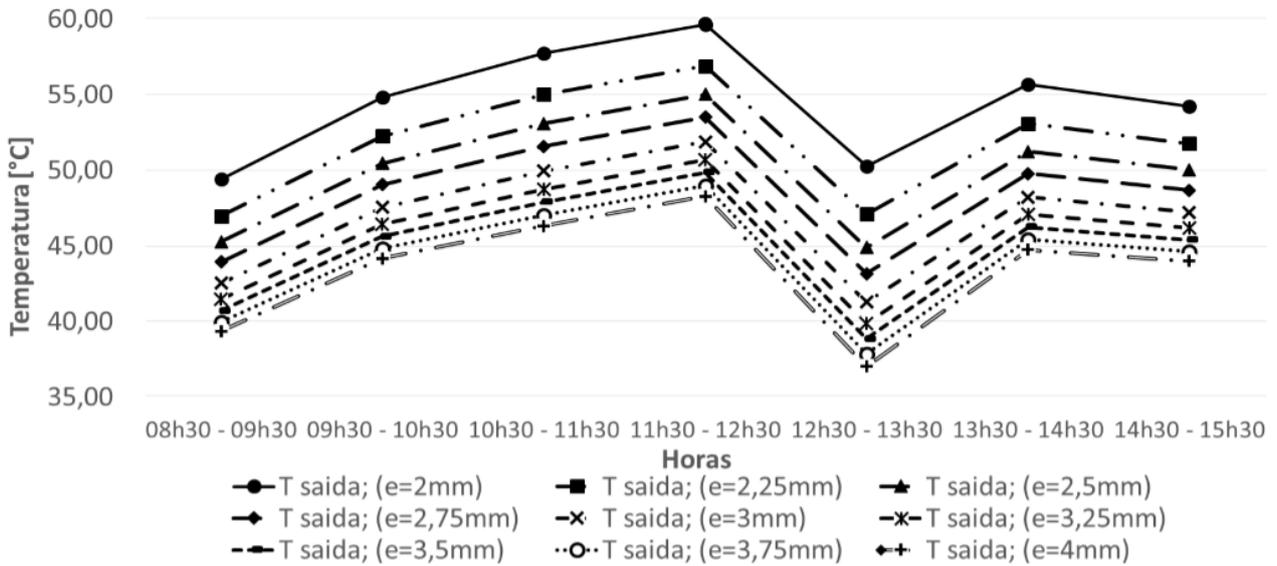


Figura 11 – Perfil das temperaturas de saída para diferentes alturas do canal.

Outro dado importante para a avaliação e obtenção da eficiência térmica dos modelos foi a vazão mássica que cada um apresentou. As vazões mássicas apresentaram um comportamento contrário às temperaturas de saída em relação a variação da altura do canal. Observa-se que as vazões mássicas relatam valores maiores à medida que se aumentou a altura do duto. Este comportamento é ilustrado na Fig. 12.

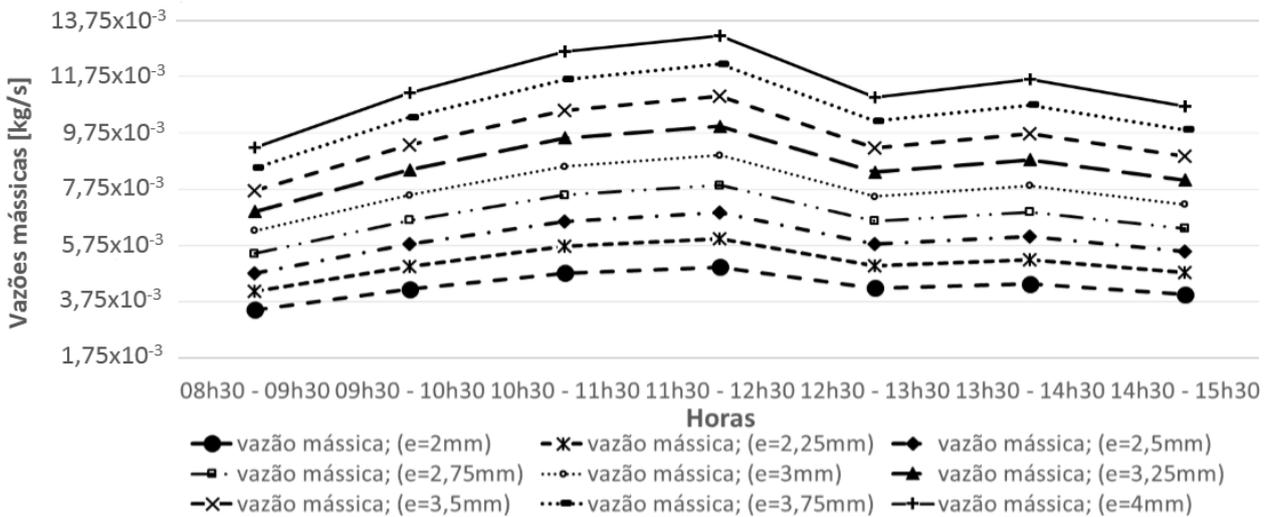


Figura 12 – Vazões mássicas para diferentes geometrias do modelo.

Estes dados permitiram verificar as eficiências térmicas e elétricas para cada uma das alturas do canal no modelo numérico. Os valores de eficiência elétrica correspondentes as alturas dos dutos do modelo são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Eficiência elétrica para diferentes geometrias do modelo.

Altura do canal [mm]:	Temperatura média da placa do modelo [°C]	Eficiência térmica [%]	Eficiência elétrica [%]
2,00	54,8	46,20	8,01
2,25	52,3	46,97	8,76
2,50	50,5	47,48	9,3
2,75	49,1	48,26	9,72
3,00	47,5	47,33	10,2
3,25	46,4	46,86	10,53
3,50	45,6	46,83	10,77
3,75	44,8	46,42	11,01
4,00	44,2	45,61	11,19

O modelo numérico que apontou uma maior eficiência térmica foi o de altura do duto de 2,75mm. Sua eficiência térmica foi de 48,26%, enquanto que o modelo inicial de 3mm de altura do duto apresentou uma eficiência de 47,33%, representando um ganho de aproximadamente 1,97%. Foi constatado que a eficiência elétrica aumenta com o aumento da altura do canal e conforme estes parâmetros é possível ainda, adotar uma determinada geometria que apresente características térmicas ou elétricas melhoradas para uma determinada condição de aplicação.

5. CONCLUSÕES

O modelo bidimensional do PV-T e as considerações adotadas conseguiram proporcionar uma boa aproximação dos resultados com os resultados experimentais. Os requisitos mais importantes para simulação numérica do modelo foi a correta interpretação dos resultados físicos e a abordagem feita para simular o efeito termossifão no *software* COMSOL *Multiphysics 4.4*. A validação do modelo permitiu que fosse feita uma análise paramétrica de uma importante variável na geometria do modelo a fim de melhorá-lo, sendo identificado que uma altura do duto igual a 2,75 mm apresenta um ganho de eficiência térmica, de aproximadamente 1,96%, sem grandes prejuízos na eficiência elétrica do modelo, tendo um decréscimo de 0,48% do seu valor referente ao modelo inicialmente proposto podendo também, adotar uma determinada geometria que apresente características térmicas ou elétricas melhoradas para uma determinada condição de aplicação.

Agradecimentos

Às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG, e também ao CEFET-MG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- CRESESB/CEPEL. Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaicos. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro, 2014. 529 p.
- Duffie, J. A.; W. A. Beckman. Solar engineering of thermal processes. 3ª edição. (New Jersey): Hardcover, 2006. 928 p.
- Guo et al., Numerical simulation and experimental validation of tri-functional Photovoltaic/thermal solar collector. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China. 2015.
- Jones, G. F., Lior, N. Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects. Philadelphia: Solar Energy, v.52, n.3, p.289-300, 1994.
- Kikas, N. P. Laminar flow distribution in solar systems. Thessaloniki: Solar Energy, v.54, n.4, p.209-217, 1995.
- Ong. K.S., A finite-difference method to evaluate the thermal performance of a solar water heater. Solar Energy, v.16, p. 137-147, 1974.
- Rodrigues, Á., Apontamentos de Energias Renováveis. Porto: FEUP, 2008.
- Touafek, K., Haddadi, M., Malek, A., Modeling and Experimental Validation of a New Hybrid Photovoltaic Thermal Collector. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, Nº.1, 2011.
- Uhlemann, R., Bansal, N.K., Side-by-comparison of a pressurized and a nonpressurized solar water heating thermosyphon system. Solar Energy, v.34, p. 317-328, 1985.
- Viana, Paulo. Avaliação Experimental de um Protótipo de Coletor Solar Híbrido para Geração Simultânea de Água quente e Eletricidade. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e Universidade Federal de São João Del Rei, Belo horizonte, 2014.

NUMERICAL ANALYSIS OF A SOLAR COLLECTOR FLAT PLATE OF HYBRID (PV-T) FOR ELECTRICITY PRODUCTION AND HOT WATER

Abstract. *This work presents a computational numerical model based on a solar collector prototype PV-T (photovoltaic-thermal panel) developed experimentally as the object of study for a master's thesis submitted to the Graduate Program in Engineering of Energy at CEFET MG. A two-dimensional numerical model was solved by COMSOL Multiphysics 4.4 software. The numerical results of the outlet temperature and mass flow were compared to the experimental values, checking an average percentage change of 4%, thus validating the numerical model. Based on the numerical values, it was also calculated the thermal efficiency solar collector PV-T and compared to experimental results. The efficiency of electric module collector was obtained indirectly from the thermal influence on the photovoltaic modules. A parametric study of influence of the geometry over water circulation channel on the thermal efficiency of the collector is also presented, and it was found that for a height of the flow channel of water equal to 2.75 millimeters, the thermal efficiency has a gain of approximately 1.96% in relation to the experimental results, and the electrical efficiency of the model showed a decrease of 0.48% compared to experimental data.*

Key words: PV-T solar collector; numerical simulation; COMSOL Multiphysics.