

BALANÇO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DE SISTEMAS HÍBRIDOS PVT CONTENDO NANOFLUIDOS

Filipe Liberato Justino Diniz– filipe.led@gmail.com

Isaias Barbosa Soares - ibaso13@gmail.com

Caio Vinícius Pinheiro Vital– caio.vital@gmail.com

Luis Arturo Gómez Malagón– lagomezma@poli.br

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Tecnologia da Energia

Resumo. *Coletores solares híbridos PV/T (Photovoltaic/Thermal) são unidades térmicas montadas em conjunto a módulos fotovoltaicos e que podem converter simultaneamente radiação solar em calor e eletricidade. Nos últimos anos, no intuito de aprimorar a conversão da energia solar em sistemas PV/T, vem sendo proposto o uso de nanofluidos, os quais são suspensões coloidais contendo nanopartículas, como um eficiente refrigerante ou/ e filtro óptico. A influência dos parâmetros constitutivos dos nanofluidos, tais como concentração, tipo, tamanho e forma da nanopartícula, afeta suas propriedades térmicas e consequentemente o desempenho dos sistemas PV/T. Nesse sentido, foi realizado o balanço energético de um sistema PV/T através da modelagem e simulação computacional das partes térmica e fotovoltaica do coletor, utilizando como fluido de trabalho nanofluidos de prata, cobre e ouro, variando o tamanho das nanopartículas e a espessura do filme. Os resultados mostraram que a parte térmica absorveu grande parte da radiação incidente, causando diminuição da potência máxima entregue pelo painel fotovoltaico. Porém essa diminuição foi compensada com o ganho em energia térmica, resultando numa maior eficiência global do sistema em relação a um painel fotovoltaico isolado. Esses resultados indicam que a utilização e otimização de nanofluidos em sistemas PV/T pode aumentar seu desempenho térmico de acordo com a demanda de calor desejada sem comprometer substancialmente o rendimento das suas células fotovoltaicas.*

Palavras-chave: Energia Solar, Coletores híbridos PV/T, Nanofluidos.

1. INTRODUÇÃO

Com a exploração intensa das reservas esgotáveis de combustíveis fósseis e os danos causados ao meio ambiente, vêm se gerando interesses cada vez maiores pelas fontes de energia renováveis, além de uma crescente conscientização sobre a necessidade de garantir alternativas de energia. Devidos a tais fatores, tem aumentada a demanda de fontes de energias sustentáveis mais eficientes e versáteis.

Uma típica utilização das energias renováveis é a energia solar que pode ser dividida em dois grandes grupos de aplicação: a energia solar fotovoltaica (PV) e a energia termossolar (TS). A energia solar fotovoltaica é resultado da conversão direta da radiação luminosa proveniente do sol em corrente elétrica através de materiais semicondutores fotossensíveis, e a energia termossolar é o resultado da conversão da luz solar em calor num fluido de trabalho.

As células fotovoltaicas são capazes de converter a luz solar em eletricidade excitando os elétrons do material semicondutor e gerando corrente elétrica, porém a resposta ao espectro solar é altamente dependente do band-gap do material semicondutor da célula solar, sendo mais eficiente a conversão quando as componentes espectrais da radiação solar estão próximas da energia do band-gap. No entanto, apenas uma parte estreita do espectro solar é absorvida e aproveitada para excitar os elétrons, sendo a outra parte do espectro solar não absorvida pelo semicondutor. Dentre os elétrons excitados, existem aqueles que absorvem muito mais energia do que o necessário para que ocorra a geração de eletricidade, tendo que dissipar a energia excedente na forma de calor num processo conhecido como “termalização”, aumentando a resistência interna e diminuindo sua eficiência e podendo reduzir a vida útil da célula solar.

Como solução para o aumento da eficiência energética, vem sendo utilizados sistemas híbridos compostos de um sistema fotovoltaico em conjunto com um sistema solar térmico. Nestes sistemas, parte do espectro da radiação pode ser melhor aproveitada no sistema fotovoltaico ou no térmico, como mostrado na Fig. 1a. Por exemplo, na configuração mostrada na Fig. 1b, a radiação solar incide no coletor solar térmico e a radiação transmitida é aproveitada pela célula fotovoltaica. O aprimoramento da eficiência dos sistemas híbridos depende do desempenho na captura da energia solar assim como no desempenho do processo de transferência de calor do fluido de trabalho (Leong *et al.*, 2016).

Um possível aperfeiçoamento para o sistema híbrido PV/T é o uso de nanofluidos para selecionar a faixa espectral que incidirá sobre o painel fotovoltaico, buscando reduzir os efeitos de termalização e aproveitando termicamente a energia não convertida em eletricidade. Nanofluidos são definidos como suspensões coloidais que contêm partículas com dimensões nanométricas (tipicamente até 100 nm) em fluidos diversos (geralmente água) (Choi e Eastman, 1995). Além disto, os nanofluidos tem propriedades ópticas que podem ser sintonizáveis segundo as características das nanopartículas em suspensão. Desta forma, o nanofluido pode trabalhar como um filtro óptico que quando posicionado

entre a fonte de luz e uma célula fotovoltaica, pode absorver toda a energia excessiva ou não absorvida pela célula fotovoltaica. Além de aumentar a eficiência combinada do sistema, reduz a degradação térmica da célula solar (Hjerrild *et al.*, 2016).

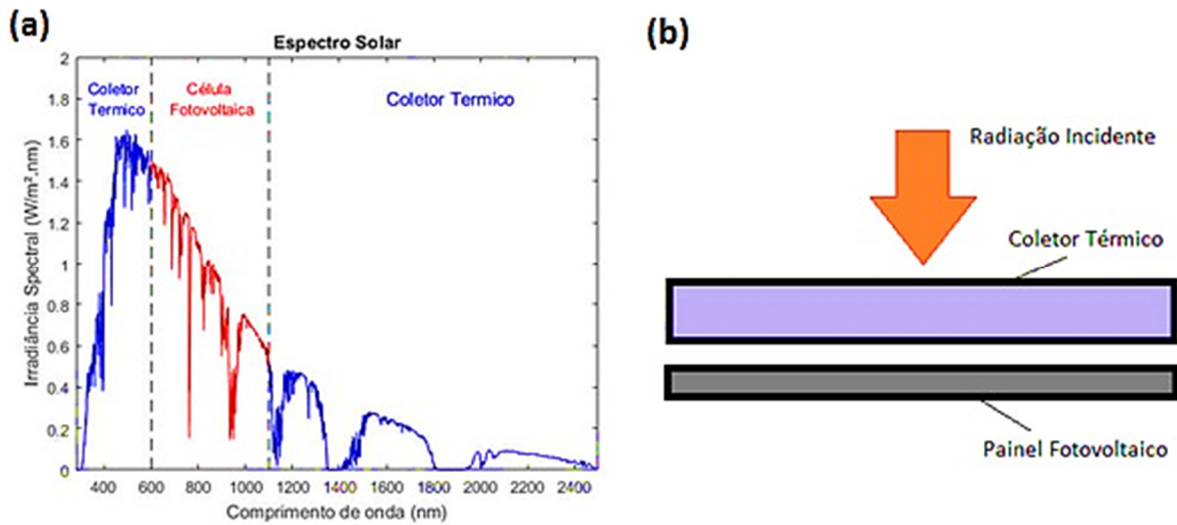


Figura 1 – (a) Esquema da divisão espectral para coletor solar híbrido PV / T. (b) Sistema PV/T usando o nanofluido como filtro óptico.

Análises teóricas de coletores híbridos empregando nanofluidos contendo nanopartículas metálica de prata, cobre e ouro, mostraram desempenho superior aos coletores que utilizam água pura como fluido de trabalho (Taylor, Otanicar e Rosengarten, 2012). Apesar da diminuição da geração de eletricidade do coletor híbrido com o nanofluido em relação ao painel fotovoltaico isolado, foi verificado em estudo teórico (Jing *et al.*, 2015) e experimental (Hjerrild *et al.*, 2016) que a eficiência exergética global do sistema híbrido PV/T é superior.

O objetivo deste estudo é comparar a energia gerada pelo coletor híbrido PV/T utilizando nanofluidos de prata, cobre e ouro, variando o fluxo mássico, a fração volumétrica, diâmetro das nanopartículas e espessura do filme de nanofluido. Para tal, foram elaborados modelos com auxílio do software MATLAB, que levam em conta os processos de absorção e espalhamento, assim como os efeitos da radiação incidente na geração de energia elétrica por um painel fotovoltaico de silício monocristalino em função da sua temperatura.

2. MODELO TEÓRICO

Neste trabalho, foi analisado o caso em que o coletor térmico localiza-se no topo do painel fotovoltaico, conforme a Fig. 1b. O modelo detalhado do sistema PV/T incluiu o acoplamento físico, óptico, térmico e elétrico do sistema. Conseqüentemente, foram elaborados três modelos: um para descrever a geração de energia elétrica por parte do painel fotovoltaico, outro para analisar fenômeno do coletor térmico e o último para analisar o balanço energético do sistema.

2.1 Modelo do painel fotovoltaico

A energia elétrica gerada pela célula fotovoltaica por unidade de área, P , é calculada conforme a equação:

$$P = V J(V) \quad (1)$$

onde $J(V)$ é a densidade de corrente instantânea e V a tensão da célula fotovoltaica.

Considerando que a densidade de corrente na célula solar pode ser calculada como uma superposição da densidade de corrente de saturação e a densidade de corrente de curto circuito, o modelo do diodo único é o mais simples para representar a relação J-V (densidade de corrente - tensão) da célula solar, sendo a relação dada por:

$$J = J_{ph} - J_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + JR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + JR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

onde J_{ph} é a densidade de corrente de curto circuito, J_0 é a densidade de corrente de saturação reversa, n é o fator de idealidade do diodo, q é a carga elementar do elétron, k a constante de Boltzman, T a temperatura da célula solar, R_s e R_{sh} são as resistências série e shunt, respectivamente. A inclusão da dependência com a temperatura da densidade de corrente de saturação reversa (Fan, 1986), a energia do band-gap, e as resistências série e shunt (Bensalem e Chegaar, 2013) modifica o perfil da relação J-V, e conseqüentemente a eficiência a célula fotovoltaica. A dependência destas variáveis com a temperatura é dada por:

$$J_0 = K_0 T^{3/n'} \exp\left(-\frac{qE_g}{mkT}\right) \quad (3)$$

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (4)$$

$$R_s = R_{s0} \exp(B_s T) \quad (5)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \exp\left(\frac{B_{sh}}{T}\right) \quad (6)$$

onde K_0 , n' e m são constantes empírica independente da temperatura, E_g é a energia do band-gap do material semiconductor da célula solar, E_{g0} é a energia do band-gap a 0K, α e β são parâmetros do material semiconductor (Varshni, 1967), B_s e B_{sh} são coeficientes específicos para o material semiconductor ($B_s, B_{sh} > 0$), e R_{s0} e R_{sh0} são as resistências a 0K.

Por outro lado, a densidade de corrente de curto circuito J_{ph} na Eq. (2) é obtida por:

$$J_{ph} = q \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{gap}} s(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

onde $s(\lambda)$ é fluxo de fótons da radiação solar incidente e é dado pela norma ASTM G-173-03, e o $EQE(\lambda)$ é a eficiência quântica espectral externa da célula solar.

Sendo assim, a potência máxima gerada pela célula, P_{max} , é calculada empregando métodos iterativos que maximizem a Eq. (1), tendo como solução a tensão e a densidade de corrente no ponto de máxima potência (V_{mpp} , J_{mpp}). A Tab. 1 mostra os valores dos parâmetros que são utilizados para o cálculo do modelo da célula fotovoltaica.

Tabela 1- Valores de diferentes parâmetros e coeficientes utilizados para a célula fotovoltaica.

PARÂMETROS	VALOR	PARÂMETROS	VALOR
K_0	0,3	β	1108 K
n'	0,96	R_{s0}	$4,6 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}^2$
m	1,15	B_s	$0,0207 \text{ K}^{-1}$
E_{g0}	1,1557 eV	R_{sh0}	$153,92 \times 10^{-4} \Omega \text{ m}^2$
α	$7,021 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$	B_{sh}	799,93 K

2.2 Modelo do coletor térmico

O coletor térmico descrito nesta seção tem a configuração de um coletor solar de absorção direta, o qual é constituído por placas de vidro formando um recipiente por onde circula o nanofluido. Para fins práticos, a transmitância ($\tau_v = 0,9$) e o índice de refração ($n_0 = 1,5$) do vidro (*soda lime silica glass*) serão considerados constantes. Assim sendo, a perda por reflexão na interface ar-vidro é de 4%.

Propriedades ópticas do nanofluido

As propriedades ópticas do fluido são descritas pelo índice de refração e coeficiente de absorção. Considerando baixa concentração de nanopartículas, o índice de refração é praticamente igual ao do fluido base, em quanto que o coeficiente de absorção do nanofluido vai depender das propriedades ópticas do fluido e das nanopartículas. Em termos gerais, o coeficiente de atenuação, K , é empregado para relacionar os efeitos de absorção e espalhamento. No caso do nanofluido, a contribuição devido ao espalhamento está relacionada com o tamanho das nanopartículas. Em particular, para tamanho de partículas menores que o comprimento de onda incidente, os efeitos de espalhamento são desprezíveis. O cálculo das propriedades ópticas do nanofluido pode ser realizado a partir de teorias de campo médio como a de Maxwell-Garnett (Myroshnychenko *et al.*, 2008) ou empregando teorias gerais como a Teoria de Mie (Bohren e Huffman, 1983). Em nosso caso, será empregada esta última abordagem por ser mais geral. Considerando os efeitos do fluido base, o coeficiente de atenuação do nanofluido pode ser escrito como:

$$K_{nanofluido} = K_{fluido \text{ base}} + K_{nanopartícula} \quad (8)$$

onde

$$K_{fluido \text{ base}} = \frac{4\pi k_{fluido \text{ base}}}{\lambda} \quad (9)$$

$$K_{nanopartícula} = \frac{3f_v Q_{e\lambda}}{2D} \quad (10)$$

sendo

$$Q_{e\lambda} = 4 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right) \operatorname{Im} \left\{ \frac{m'^2 - 1}{m'^2 + 2} \left[1 + \frac{\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2}{15} \left(\frac{m'^2 - 1}{m'^2 + 2} \right) \left(\frac{m'^4 + 27m'^2 + 38}{2m'^2 + 3} \right) \right] \right\} + \frac{8}{3} \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^4 \left| \frac{m'^2 - 1}{m'^2 + 2} \right|^2 \quad (11)$$

e

$$m' = \frac{m'_{partículas}}{m'_{fluido}} \quad (12)$$

onde m' é o índice refrativo complexo normalizado ($m' = n'' + ik'$), n'' é o índice de refração, k' é o coeficiente de extinção, D é o diâmetro das partículas e f_v é a fração volumétrica definida como razão entre o volume das nanopartículas e o volume total.

Dessa forma, a quantidade de radiação que passa através de um fluido de espessura l , tendo como radiação incidente a radiação solar, $I_{0\lambda}$, pode ser calculada a partir da Lei de Lambert-Beer, assim:

$$I(l) = I_{0,\lambda} \exp(-K_{nanofluido} \cdot l) \quad (13)$$

ou pode ser determinada em qualquer posição ao longo da direção de propagação solucionando a expressão:

$$\frac{\partial I_\lambda}{\partial y} = -K_{nanofluido} I_\lambda \quad (14)$$

Propriedades termofísicas do nanofluido

Como mencionado anteriormente, os nanofluidos apresentam propriedades termofísicas diferentes dos fluidos base. Sendo assim, as propriedades tais como densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade são essenciais para descrever o comportamento térmico do sistema PV/T.

A densidade efetiva do nanofluido (ρ_{nf}) proposta na literatura pode ser expressa analiticamente com base no balanço de massa usando a teoria de mistura convencional, onde ρ_{bf} é a densidade do fluido de base, e ρ_p é a densidade do material da nanopartícula, assim (Pak e Cho, 1998):

$$\rho_{nf} = (1 - fv)\rho_{bf} + fv\rho_p \quad (15)$$

O calor específico do nanofluido proposto pode ser expresso como uma mistura do calor específico do material da nanopartícula ($C_{p,p}$) e do fluido de base ($C_{p,bf}$) quando as fases estão em equilíbrio térmico, como (Xuan e Roetzel, 2000):

$$c_{p,nf} = \frac{[(1 - fv)\rho_{bf}c_{p,bf} + fv\rho_p c_{p,p}]}{\rho_{nf}} \quad (16)$$

Por outro lado, a condutividade do nanofluido pode ser expressa como (Maxwell, 1873):

$$k_{nf} = \left[\frac{(k_{np} + 2k_{bf}) - 2fv(k_{bf} - k_{np})}{(k_{np} + 2k_{bf}) + fv(k_{bf} - k_{np})} \right] k_{bf} \quad (17)$$

onde k_{bf} é a condutividade térmica do fluido base e k_{np} a condutividade térmica da nanopartícula.

Finalmente, a viscosidade do nanofluido (μ_{nf}) pode ser escrita a partir da equação de Einstein (Einstein, 1906) onde μ_{bf} é a viscosidade do fluido base, assim:

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5f_v)\mu_{bf} \quad (18)$$

2.3 Mecanismos de transferência de calor

Para realizar o balanço de energia no sistema PV/T mostrado na Fig. 2, é necessário conhecer os coeficientes de transferência de calor por convecção nas interfaces de componentes.

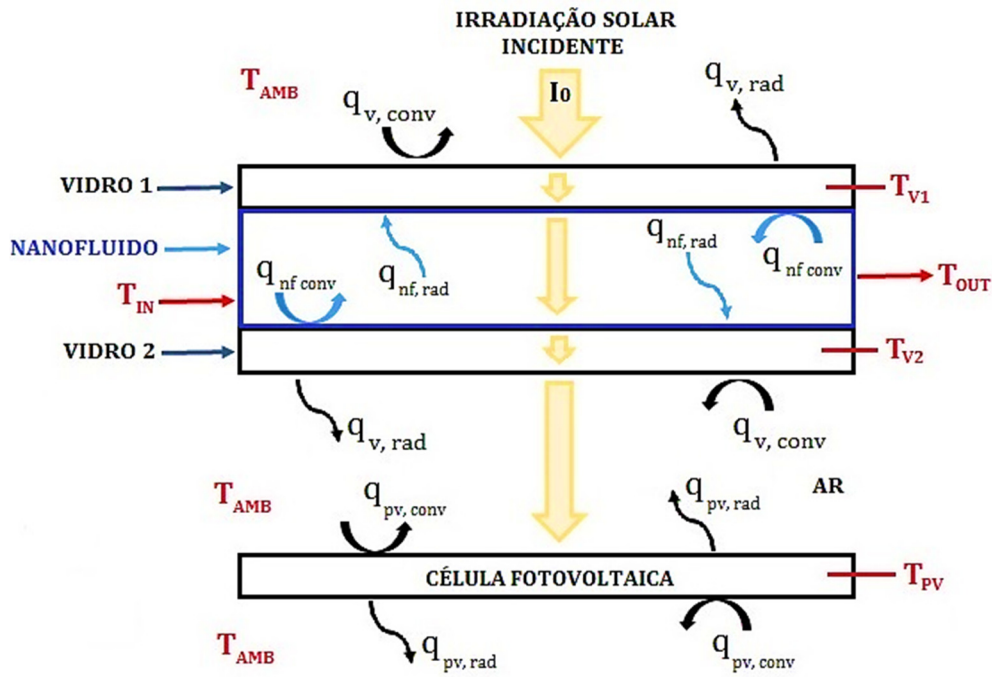


Figura 2 - Sistema híbrido PV/T para os estudo proposto.

Interface Vidro - Ar

O coeficiente de transferência de calor por convecção na interface do vidro 1 com o ar é dado pela seguinte expressão:

$$h_{v,conv} = \frac{Nu_{v-amb} k_{amb}}{L_c} \quad (19)$$

onde Nu é o número de Nusselt (Incropera *et al.*, 2008) para interface vidro/ar, k_{amb} é a condutividade térmica do ar, L_c é o comprimento característico da superfície de interesse (comprimento do coletor).

Por outro lado, devido ao mecanismo de radiação, a taxa líquida de transferência de calor por radiação da superfície do vidro (assumindo a condição de superfície cinza) expressa por unidade de área é dado pela seguinte expressão:

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (20)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman, ε é a emissividade da superfície, T_{amb} a temperatura do ambiente e T_s a temperatura da superfície.

Interface Nanofluido - Vidro

O nanofluido transfere calor para o vidro 1 e 2 por convecção com coeficiente descrito na Eq. (21).

$$h_{nf,conv} = \frac{Nu_{nf} k_{nf}}{D_h} \quad (21)$$

Onde Nu_{nf} é o número de Nusselt que é dado pela correlação de Dittos-Boelter (Choi e Eastman, 1995), considerando que o nanofluido escoa em regime turbulento em um tubo circular liso, assim:

$$Nu_{nf} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (22)$$

com

$$Re = \frac{\rho_{nf} D_h u}{\mu_{nf}} \quad (23)$$

$$Pr = \frac{\mu_{nf} c_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (24)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico para o coletor, α_{nf} é o coeficiente de absorção do nanofluido, Re é o número de Reynolds para o nanofluido (Sharma et al., 2012), Pr é o número de Prandtl para o nanofluido, e ρ_{nf} , μ_{nf} , $C_{p,nf}$, k_{bf} são, a massa específica, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do nanofluido, respectivamente, sendo u a velocidade do nanofluido.

Interface Célula fotovoltaica - Ar

A célula fotovoltaica transfere calor para o ambiente por convecção com coeficiente descrito na Eq. (19). E por radiação com taxa líquida de transferência de calor para o ambiente descrito na Eq. (20), com valor de emissividade (ε) semelhante ao do vidro.

2.4 Balanço energético

O modelo matemático utilizado no presente estudo foi derivado da Primeira Lei da Termodinâmica, usando a equação do balanço de energia para cada elemento do coletor PV/T apresentado na Fig. 2. Para uma transferência de calor unidimensional, a equação geral do balanço de energia para o volume de controle do sistema é dada por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_g \quad (25)$$

onde $\partial U/\partial t$ é a mudança na energia interna em relação ao tempo, \dot{Q}_{in} é a taxa de energia que entra no sistema, \dot{Q}_{out} é a taxa de energia que sai do sistema, e \dot{Q}_g é a taxa de geração de energia dentro do sistema. Como consideraremos o coletor PV/T operando em regime permanente, logo, a mudança na energia interna é nula.

O fluxo de calor baseado no sistema PV/T é mostrado na Fig. 2. Para o sistema PV/T analisado, o equilíbrio térmico é representado pelas equações de (26) a (29).

Vidro

$$h_{nf,conv}(T_{nf} - T_{v1}) + \alpha_{v1}I_0 - h_{v,conv}(T_{v1} - T_{amb}) - \sigma\varepsilon_v(T_{v1}^4 - T_{amb}^4) = 0 \quad (26)$$

Nanofluido

$$\tau_{v1}\alpha_{nf}I_0 - h_{nf,conv}(2T_{nf} - T_{v1} - T_{v2}) - \frac{\dot{m}_{nf}c_{p,nf}(T_{nf,in} - T_{nf})}{A} = 0 \quad (27)$$

Vidro

$$h_{nf,conv}(T_{nf} - T_{v2}) + \tau_{v1}\tau_{nf}\alpha_{v2}I_0 - h_{v,conv}(T_{v2} - T_{amb}) - \sigma\varepsilon_v(T_{v2}^4 - T_{amb}^4) = 0 \quad (28)$$

Célula fotovoltaica

$$\tau_{v1}\tau_{nf}\tau_{v2}\alpha_{pv}I_0 - J_{mpp}V_{mpp} - 2h_{pv,conv}(T_{pv} - T_{amb}) - 2\sigma\varepsilon_{pv}(T_{pv}^4 - T_{amb}^4) = 0 \quad (29)$$

O balanço elétrico da célula fotovoltaica, é obtido por um sistema de equações, formado pela equação de Tensão X Densidade de Corrente da célula fotovoltaica operando em máxima potência, representado pela Eq. (30), e pela obtenção das raízes da derivada da Eq. (1), representado pela Eq. (31), onde é possível obter o ponto de máxima potência elétrica.

$$J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{mpp} + J_{mpp}R_s)}{nkT_{pv}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + J_{mpp}R_s}{R_{sh}} - J_{mpp} = 0 \quad (30)$$

$$J_{ph} + J_0 - J_0 \left(1 + \frac{qV_{mpp}}{nkT_{pv}} \right) \exp\left(\frac{qV(1 + J_{mpp}R_s)}{nkT_{pv}}\right) - \frac{2V_{mpp} + J_{mpp}R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (31)$$

J_{mpp} e V_{mpp} são a densidade de corrente e a tensão de máxima potência. Esse sistema de equações é incluído balanço energético, pois a potência elétrica gerada também é em função da temperatura da célula fotovoltaica (T_{pv}).

As equações de (26) a (31) para o balanço energético, contém 6 variáveis desconhecidas (J_{mpp} , V_{mpp} , T_{pv} , T_{nf} , T_{v1} , T_{v2}). O sistema de equações foi resolvido por meio de programação implementada no software MATLAB.

A Tab. 2 mostra os valores dos parâmetros que são utilizados para o cálculo do balanço de energia do sistema.

Tabela 2 - Valores de diferentes parâmetros e coeficientes utilizados neste estudo.

PARÂMETROS	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
Emissividade (ε)	0,9	Área (A)	1 m ²
Temperatura ambiente (T_{amb})	298 K	Comprimento do coletor (l)	1 m
Irradiação solar incidente (I_0)	1000 W/m ²	Largura do coletor (w)	1 m
Temperatura de entrada ($T_{nf,in}$)	298 K	Comprimento característico (L_c)	1 m
Nusselt do ar (Nu_{v-amb})	9,3880	Condutividade térmica da água	0,591 W/(m K)
Condutividade térmica do ar (k_{amb})	0,026 W/(m K)	Densidade da água	995,7 kg/m ³
Espessura dos vidros	0,001 m	Capacidade térmica da água	4178,4 J/(kg K)
Diâmetro hidráulico (D_h)	0,002 m	Viscosidade da água	0,8x10 ⁻³ Pa s

2.5 Introdução a exergia

Também conhecida como disponibilidade ou potencial máximo de trabalho de uma substância, representa o trabalho máximo que pode ser obtido quando uma quantidade de matéria é levada ao estado de equilíbrio termodinâmico (mecânico, térmico e químico) com o meio ambiente, envolvendo interações apenas com os componentes do meio ambiente através de processos reversíveis (Szargut, Morris e Steward, 1988).

As energias elétrica e térmica são as saídas úteis do sistema híbrido PV/T analisado. No entanto, elas não têm o mesmo grau de qualidade, pois a energia elétrica pode converter-se completamente em trabalho e, portanto, tem uma exergia igual à sua energia. Contudo, a energia térmica tem conteúdo de exergia inferior ao seu conteúdo energético, pois a partir da Segunda Lei da Termodinâmica, no qual o trabalho máximo que pode ser extraído de uma máquina térmica é igual a o produto entre a eficiência de Carnot e o calor trocado, ou seja, a disponibilidade máxima de trabalho é menor que a energia térmica trocada. Logo, a eficiência exergética térmica de um sistema híbrido PV/T é dada pelo produto da eficiência de Carnot e a eficiência térmica do sistema.

2.6 Eficiências energética e exergética

Quando todas as variáveis desconhecidas foram computadas, as eficiências térmica e elétrica do sistema PV/T podem ser calculadas pelas equações (32) e (33), onde I_0 é irradiação solar incidente no plano do coletor.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{nf,in} - T_{nf,out})}{I_0} \quad (32)$$

$$\eta_{el} = \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{I_0} \quad (33)$$

Porém, devido ao fato de que a energia elétrica e térmica não tem o mesmo grau de qualidade, o método de análise de eficiência energética não é uma abordagem adequada para dispositivos de energia renovável, uma vez que não diferencia a qualidade da energia. Portanto, o conceito de exergia é o mais adotado, pois inclui aspectos de qualidade da energia. As eficiências exergéticas do sistema PV/T podem ser calculadas assim (Otanicar, Taylor e Telang, 2013):

$$\eta_{ex,eletrica} = \eta_{el} \quad (34)$$

$$\eta_{ex,termica} = C \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{nf,out}} \right) \eta_{th} \quad (35)$$

$$\eta_{ex} = \eta_{ex,eletrica} + \eta_{ex,termica} \quad (36)$$

onde $(1 - T_{amb}/T_{nf,out})$ é a eficiência de Carnot, T_{amb} é a temperatura ambiente e C é a fração da energia térmica convertida em saída elétrica e assumida para este trabalho como sendo de 1,0, considerando que o trabalho gerado a partir da energia térmica produzida pode ser totalmente convertido em energia elétrica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para resolver as equações do balanço energético da Seção 2.4, foram analisadas quatro condições diferentes:

- Na primeira condição foi mantida o diâmetro da nanopartícula ($D = 10$ nm), a espessura do filme de nanofluido ($t = 1$ mm) e a fração volumétrica ($f_v = 0,0001\%$), variando apenas o fluxo mássico (de 0 até 0,2 kg/s).

- b) Na segunda condição foram mantidos o diâmetro da nanopartícula ($D = 10$ nm), a espessura do filme de nanofluido ($t = 1$ mm), o fluxo mássico ($\dot{m} = 0,02$ kg/s), variando apenas a fração volumétrica (de 0 até 0,0003%).
- c) Na terceira condição foram mantidas a fração volumétrica ($f_v = 0,0001\%$), a espessura do filme de nanofluido ($t = 1$ mm), o fluxo mássico ($\dot{m} = 0,02$ kg/s), variando apenas o diâmetro da nanopartícula (de 0 até 100nm).
- d) Por fim, na quarta condição foram mantidas a fração volumétrica ($f_v = 0,0001\%$), o diâmetro da nanopartícula ($D = 10$ nm), o fluxo mássico ($\dot{m} = 0,02$ kg/s), variando apenas a espessura do filme de nanofluido (de 0 a 10 mm). Todas as quatro condições foram analisadas para nanopartículas de prata, cobre e ouro.

A Fig. 3 mostra as potências obtidas para as condições apresentadas, e a Fig. 4 mostra a eficiência exergética total.

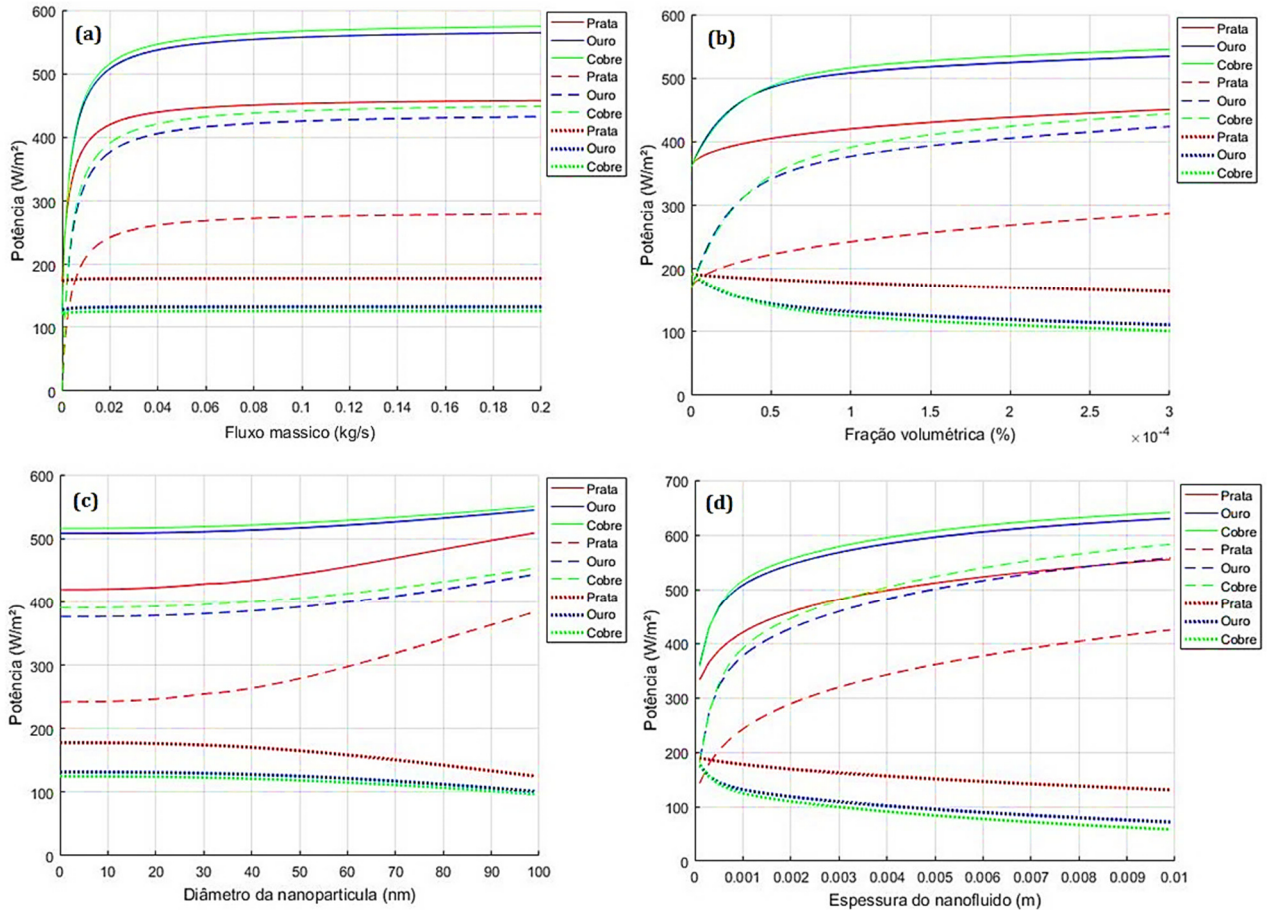


Figura 3 - Comparação entre as potências gerada (elétrica, térmica e total) por unidade de área. (a) Em função da fluxo mássico. (b) Em função da fração volumétrica. (c) Em função do diâmetro da nanopartícula. (d) Em função da espessura do nanofluido. Linha pontilhada é a potência elétrica, a linha tracejada é a potência térmica e a linha cheia é potência total.

Na Fig. 3 pode-se verificar que:

- A energia elétrica produzida pela célula fotovoltaica não depende do fluxo mássico de nanofluido, tendo em vista que o aumento do fluxo não altera as características ópticas do nanofluido. Porém, a energia térmica gerada tem um aumento considerável até 0,04 kg/s, pois para valores maiores há um aumento significativo na velocidade do fluxo, diminuindo o tempo para absorção da energia solar.
- Com o aumento da fração volumétrica, há uma diminuição gradativa da energia elétrica gerada, pois a medida que a fração volumétrica aumenta o nanofluido vai se tornando mais opaco, absorvendo cada vez mais a luz solar incidente, e conseqüentemente, deixando passar menos luz para a célula fotovoltaica.
- O diâmetro da nanopartícula passa a influenciar de forma relevante na produção de energia elétrica e térmica, a partir dos 40 nm. Aumentando a produção de energia térmica e diminuindo a produção de energia elétrica, conseqüentemente.
- O incremento na espessura do filme de nanofluido, aumenta a sua capacidade de absorção da radiação solar, aumentando a produção de energia térmica e reduzindo a geração de energia elétrica.

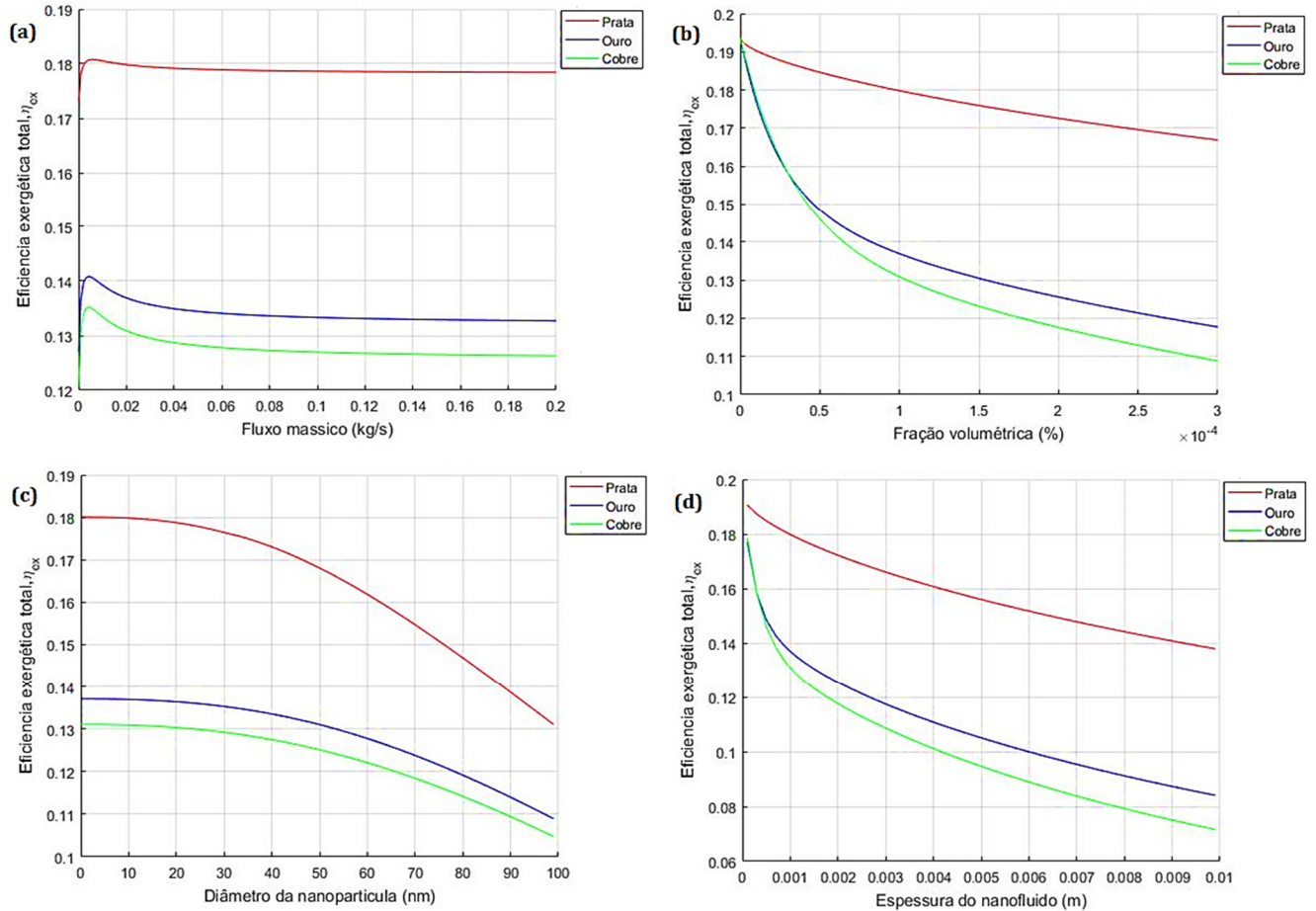


Figura 4 - Comparação entre as eficiências exergeticas total. (a) Em função da fluxo mássico. (b) Em função da fração volumétrica. (c) Em função do diâmetro da nanopartícula. (d) Em função da espessura do nanofluido.

Por outro lado, na Fig. 4 verifica-se que:

- A eficiência exergetica em função do fluxo mássico tem uma máxima em torno de 0,005 kg/s, isso se caracteriza pelo fato de que fluxos mais baixos que 0,005 kg/s reduzem a velocidade do nanofluido, permitindo que ele permaneça muito tempo no coletor, consequentemente, aumenta as perdas de calor por convecção e radiação para o ambiente externo. Entretanto, para fluxos acima de 0,005 kg/s, a velocidade do nanofluido é alta, diminuindo as perdas de calor para o ambiente.
- Com o aumento da fração volumétrica há uma diminuição da eficiência exergetica, pois a medida que a fração volumétrica aumenta o nanofluido absorve cada vez mais a luz solar incidente, e consequentemente, deixando passar menos luz para a célula fotovoltaica.
- Para todos os nanofluidos, a eficiência exergetica em função do diâmetro da nanopartícula mantém-se praticamente constante até aproximadamente 20 nm, diminuindo para valores de diâmetro maiores pois a parte da exergia relativa geração de energia elétrica passa a diminuir.
- A eficiência exergetica diminui com o incremento na espessura do nanofluido, pois a absorção da radiação solar pelo nanofluido cresce exponencialmente em função da espessura resultando em menor produção de energia elétrica.

4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo óptico e de transferência de calor que permitiu a estimativa das saídas elétricas e térmicas, de um sistema híbrido PV/T com nanofluido funcionando como fluido de trabalho e filtro óptico, e investigando seu desempenho para nanopartículas de prata, ouro e cobre, variando os seus parâmetros.

Esta análise teórica do balanço energético revelou que, o nanofluido de prata tem uma produção de energia elétrica maior, pois o nanofluido de prata absorve menos radiação solar que os nanofluidos de ouro ou cobre. Por isso, é ideal para sistemas híbridos PV/T em que a produção de energia elétrica seja prioritária.

Por outro lado, os resultados da simulação provaram que o nanofluido de cobre tem uma produção de energia térmica maior, pois absorve mais radiação solar que os nanofluidos de prata ou ouro. Por isso, é ideal para sistemas híbridos PV/T em que a produção de energia térmica seja prioritária.

Considerando os objetivos do trabalho, conclui-se que em termos de eficiência exérgica, o nanofluido de prata apresenta melhor desempenho em todas as condições analisadas, pois tem uma produção de energia elétrica maior comparado ao cobre e o ouro, resultando consequentemente, melhor eficiência exérgica.

REFERÊNCIAS

- Bensalem, S. e Chegaar, M., 2013. Thermal behavior of parasitic resistances of polycrystalline silicon solar cells, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 16 N°1, pp. 171 - 176.
- Bohren, C. F. e Huffman, D. R., 1983. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Choi, S. U. S. e Eastman, J. A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 99–105.
- Einstein, A., 1906. Eine neue bestimmung der molekuldimensionen. *Annalen der Physik*.
- Fan, J. C. C., 1986. Theoretical Temperature Dependence of Solar Cell Parameters, *Solar Cells*, vol. 17, pp. 309–315.
- Hjerrild, N. E., Mesgari, S., Crisostomo, F., Scott, J. A., Amal, R. e Taylor, R. A., 2016. Hybrid PV/T enhancement using selectively absorbing Ag-SiO₂/carbon nanofluids, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 147, pp. 281–287.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L. e Lavine, A. S., 2008. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Jing, D., Hu, Y., Liu, M., Wei, J. e Guo, L., 2015. Preparation of highly dispersed nanofluid and CFD study of its utilization in a concentrating PV/T system, *Solar Energy*, vol. 112, pp. 30–40.
- Leong, K. Y., Ong, H. C., Amer, N. H., Norazrina, M. J., Risby, M. S. e Ku Ahmad, K. Z., 2016. An overview on current application of nanofluids in solar thermal collector and its challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, p. 1092–1105.
- Maxwell, J. C., 1873. *A treatise on electricity and magnetism*.
- Myroshnychenko, V., Rodríguez-Fernández, J., Pastoriza-Santos, I., Funston, A. M., Novo, C., Mulvaney, P., Liz-Marzán, L. M. e García de Abajo, F. J., 2008. Modelling the optical response of gold nanoparticles, *Chemical Society Reviews*, vol. 37, pp. 1792.
- Otanicar, T. P., Taylor, R. A. e Telang, C., 2013. Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5(3), p. 33124.
- Pak, B. C. e Cho, Y. I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersal fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, vol. 11(2), p. 151–170.
- Sharma, K. V., Sarma, P. K., Azmi, W. H., Mamat, R., Kadirgama, K., nf, B. e μ , ρ UD., 2012. Correlations To Predict Friction and Forced Convection Heat Transfer Coefficients of Water Based Nanofluids, *Ijmntftp*, vol.3(4), p. 1–25.
- Szargut, J., Morris, D. R. e Steward, F. R., 1988. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes.
- Taylor, R. a, Otanicar, T. e Rosengarten, G., 2012. Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems, *Light: Science & Applications*, vol. 1(10), p. e34.
- Varshni, Y. P., 1967. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica*, vol. 34(1), pp. 149–154.
- Xuan, Y. e Roetzel, W., 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43(19), p. 3701–3707.

ENERGETIC AND EXERGETIC BALANCE OF PVT HYBRID SYSTEMS CONTAINING NANOFLUIDS

Abstract. *Solar PV/T (Photovoltaic/Thermal) solar collectors are thermal units mounted together to photovoltaic modules and can simultaneously convert solar radiation into electricity and heat. In recent years, in order to improve the conversion of solar energy into PV/T systems, it has been proposed the use of nanofluids, which are colloidal suspensions containing nanoparticles, as an efficient coolant and/or optical filter. The influence of the constitutive parameters of nanofluids, such as concentration, type, size and shape of the nanoparticle, influence their thermal properties and consequently the performance of PV / T systems. In this sense, the energy balance of a PV / T system was performed through computational modeling and simulation of the thermal and photovoltaic parts of the collector, using nanofluids of silver, copper and gold as the working fluid, varying the size of the nanoparticles and the thickness of the film. The results obtained that the thermal part absorbed much of the incident radiation, causing a decrease in the maximum power delivered by the photovoltaic panel. However, this decrease was compensated by the gain in thermal energy, resulting in a greater overall efficiency of the system compared to an isolated photovoltaic panel. These results indicate that the use and optimization of nanofluids in PV/T systems can increase their thermal performance according to the desired heat demand without substantially compromising the performance of their photovoltaic cells.*

Key words: *Solar Energy, PV/T Hybrid Collectors, Nanofluids.*