

AVALIAÇÃO DO USO DE NANOFLUIDO DE NITRETO DE TITÂNIO EM COLETOR SOLAR DE ABSORÇÃO DIRETA

Caio Vinicius Pinheiro Vital – caio.vital@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Laboratório de Óptica Biomédica e Imagens

Diego Rativa – diego.rativa@poli.br

Universidade de Pernambuco, Instituto de Inovação Tecnológica

Luis Arturo Gómez-Malagón – lagomezma@poli.br

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco

Renato Evangelista de Araujo – renato.earaujo@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Laboratório de Óptica Biomédica e Imagens

Resumo. *O desenvolvimento de tecnologias relacionadas a coletores solares térmicos é fundamental para o progresso de uma matriz energética renovável. Nesse contexto, um avanço recente foi o uso de nanofluidos plasmônicos em coletores solares de absorção direta, que utilizam o próprio fluido de trabalho como elemento absorvedor de radiação solar. O uso dessa tecnologia, entretanto, é limitado pelo elevado custo de produção dos nanofluidos compostos por metais nobres. Neste trabalho, avalia-se numericamente o desempenho de um coletor de absorção direta com nanofluido de nitreto de titânio, que possui custo reduzido em relação aos nanofluidos de metais nobres. A interação das nanopartículas com a luz solar foi investigada explorando o Método dos Elementos Finitos no software COMSOL Multiphysics. O comportamento térmico do coletor foi avaliado utilizando Método das Diferenças Finitas no software MATLAB para solucionar a equação de um balanço energético em duas dimensões. A avaliação do coletor com nanofluido de nitreto de titânio teve como parâmetros de referência os desempenhos de coletores utilizando nanofluidos de metais nobres. Os resultados mostram que as partículas de nitreto de titânio exibem um espectro de absorção mais largo que os de metais nobres, o que tem como consequência uma melhor performance dos coletores de absorção direta utilizando o material proposto. Verificou-se que a eficiência térmica do coletor com nanofluido de nitreto de titânio alcança valores de até 79%, enquanto que os coletores com partículas de ouro e prata têm eficiências limitadas a 48% e 37%, respectivamente. Dessa forma, o nanofluido de nitreto de titânio se apresenta como um material promissor para o aumento da performance de coletores solares de absorção direta.*

Palavras-chave: Coletor Solar, Nanofluidos, Exergia.

1. INTRODUÇÃO

As atuais circunstâncias econômicas, sociais e ambientais favorecem a transição da matriz energética global para fontes renováveis. O recurso solar é abundante no Brasil e tem grande potencial para utilização tanto em conversão fotovoltaica quanto em conversão térmica, o que torna a energia solar fundamental para o desenvolvimento de uma matriz energética limpa no país.

Visando uma maior inserção da energia solar no atendimento às demandas de energia térmica, é vital o desenvolvimento de novos dispositivos de conversão solar térmica, assim como o aprimoramento das tecnologias existentes. Em particular, foram desenvolvidos coletores solares que utilizam o próprio fluido de trabalho como elemento absorvedor: os coletores solares de absorção direta (Tyagi, 2009). Esses coletores são constituídos por duas placas paralelas, dentre as quais há fluxo do fluido de trabalho, como apresentado na Fig. 1. A placa superior é uma cobertura transparente para a radiação solar e a placa inferior é composta por material termicamente isolante. Os coletores de absorção direta apresentam comportamento térmico semelhante ao de um coletor de placa plana, porém com desempenho superior em temperaturas de operação próximas à ambiente (Tyagi et al., 2009). No caso das aplicações em baixas temperaturas, um avanço recente foi o uso de nanofluidos nos coletores solares em sistemas de aquecimento indireto (Xiong et al., 2021).

Nanofluidos são soluções coloidais compostas por um fluido base e nanopartículas. No caso de aplicações em energia solar térmica, os fluidos base são substâncias normalmente utilizadas como fluido de trabalho em coletores, como por exemplo água e etilenoglicol. A adição de nanopartículas aos fluidos de trabalho tradicionais resulta em líquidos de maior condutividade térmica, que podem ser explorados para aumento da eficiência de coletores de placa plana e de tubos evacuados (Vital et al., 2016; Choudhary et al., 2020).

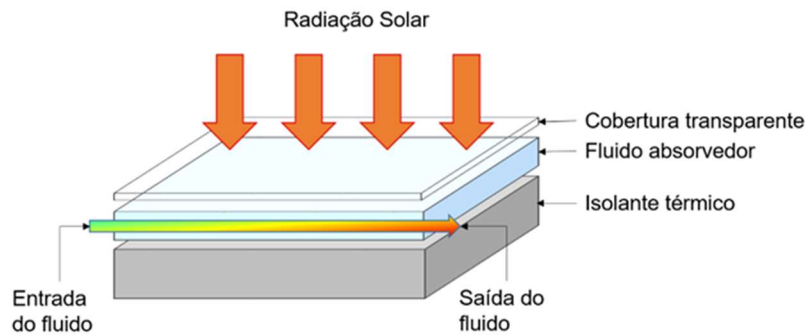


Figura 1 - Diagrama esquemático de um coletor solar de absorção direta. Fonte: Autores.

Além das alterações nas propriedades termofísicas dos fluidos, as nanopartículas modificam as propriedades ópticas de absorção devido ao fenômeno de ressonância de plasmão de superfície localizado, que acentua a absorção de luz por nanopartículas condutoras para determinados comprimentos de onda. Dessa forma, nanofluidos plasmônicos com pico de absorção compatível com o espectro solar podem ser utilizados como fluidos de trabalho em coletores de absorção direta.

Apesar de ser uma tecnologia emergente extensamente explorada na literatura, o uso de nanofluidos plasmônicos em coletor solar de absorção direta ainda possui limitações que impedem sua inserção comercial: o alto custo de produção e a instabilidade química dos nanofluidos (Xiong et al., 2021). O alto custo se deve ao fato de que as nanopartículas mais exploradas para absorção de luz são nanoesferas compostas por metais nobres, como ouro e prata (Chen et al., 2016; Vital et al., 2018).

As propriedades de absorção de luz por nanopartículas dependem do material que as compõe, da sua geometria e do meio no qual estão dispersas. Dessa forma, esforço tem sido despendido buscando nanofluidos de alto desempenho na absorção solar explorando diferentes geometrias e materiais alternativos para a produção de nanopartículas plasmônicas (Farooq et al., 2020). Um importante avanço recente nesse aspecto foi a proposta de uso de nanofluidos compostos por nanopartículas de nitretos de metais de transição (TiN, ZrN e HfN) em coletores de absorção direta (Vital et al., 2021), sendo o nitreto de titânio o material mais promissor dentre os analisados. Além do TiN possuir custo consideravelmente inferior ao de metais nobres, coletores utilizando nanofluidos desse material necessitam de baixas concentrações de nanopartículas para apresentar desempenho satisfatório (quando comparados com coletores utilizando metais nobres).

Objetivando contribuir para o progresso dos coletores solares de absorção direta, este trabalho explora numericamente a performance de um coletor utilizando nanofluido de nitreto de titânio em água e apresenta contribuições adicionais às previamente reportadas na literatura, incluindo análise espectral da radiação absorvida e avaliação do desempenho em função da vazão mássica do fluido.

2. MODELAGEM DO NANOFLUIDO

Para avaliação da performance do coletor de absorção direta, é fundamental o conhecimento das propriedades ópticas e termofísicas do fluido de trabalho.

As propriedades termofísicas do fluido são obtidas como combinações das propriedades do fluido base (água) e das nanopartículas, de acordo com a concentração utilizada. Neste trabalho, são explorados cenários de concentrações muito baixas (da ordem de 0,001% em volume) e, portanto, pode-se considerar que as propriedades termofísicas da água não são afetadas pela adição das nanopartículas. Dessa forma, a densidade, o calor específico e a condutividade do nanofluido são considerados similares aos da água, obtidos de dados experimentais reportados na literatura (Poling et al., 2008).

Por outro lado, as propriedades ópticas do fluido são significativamente afetadas pela adição de nanopartículas mesmo em regime de baixa concentração. Assim, faz-se necessário modelar a interação da radiação solar com as nanopartículas.

A seção transversal de absorção (σ_{abs}) da nanopartícula foi obtida via método de elementos finitos no software *COMSOL Multiphysics*, utilizando o módulo RF no domínio da frequência para solução da Equação de Helmholtz para o campo elétrico (E), dada por:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = 0, \quad (1)$$

onde ω é a frequência da luz incidente e μ e ϵ são a permeabilidade e a permissividade do material, respectivamente. As propriedades ópticas dos materiais foram obtidas de resultados experimentais reportados na literatura para água (Hale e Querry, 1973), nitreto de titânio (Palik, 1998) e ouro (Johnson e Christy, 1972). A Fig. 2(a) mostra a modelagem da nanopartícula envolta por água, com a presença de uma camada de delimitação do domínio na interface do software *COMSOL Multiphysics*. A malha de elementos finitos utilizada para a solução da equação diferencial é mostrada na Fig. 2(b).

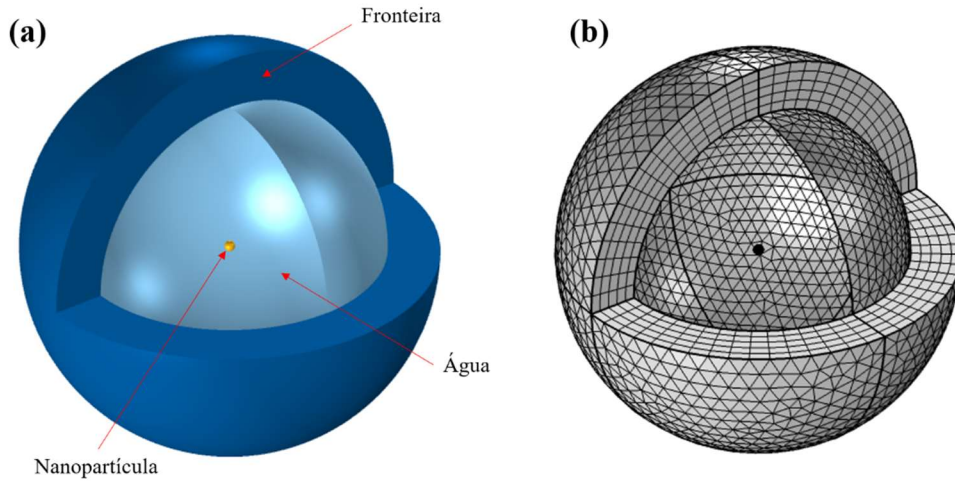


Figura 2 - (a) Domínio computacional da nanopartícula e (b) Malha de elementos finitos. Fonte: Autores.

Os valores de campo elétrico são calculados para todo o domínio e, posteriormente, é obtida a potência eletromagnética. A seção transversal de absorção na nanoestrutura (σ_{abs}) é obtida pela razão entre o valor de potência dissipada na nanopartícula (Q_{np}) e a potência da onda eletromagnética incidente (P_{inc}) na seguinte forma:

$$\sigma_{abs} = \frac{Q_{np}}{P_{inc}} \quad (2)$$

A partir da seção transversal de absorção, é possível obter o coeficiente de atenuação (α) do nanofluido da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{p}{V_{np}} \sigma_{abs}, \quad (3)$$

em que V_{np} é o volume de cada nanopartícula e p é a fração volumétrica (razão entre o volume de nanopartículas e o volume total do nanofluido). A partir deste resultado e utilizando Lei de Lambert-Beer calcula-se o fluxo de calor gerado pela absorção de luz (q_r) numa camada de nanofluido com espessura y . Desta forma q_r é dado por:

$$q_r(y) = I_0(1 - e^{-\alpha y}), \quad (4)$$

onde I_0 é a radiação incidente, em W/m^2 .

3. MODELAGEM DO COLETOR SOLAR DE ABSORÇÃO DIRETA

Como mostrado na Fig. 1, o coletor solar de absorção direta tem geometria retangular simples, com uma cobertura de vidro na parte superior e isolamento térmico no fundo. Há perdas térmicas por condução e convecção pelo o topo. O fundo é considerado adiabático e as perdas pelas laterais do coletor são desprezadas por serem insignificantes quando comparadas às perdas pela cobertura. Assim, é possível reduzir o problema para um modelo em duas dimensões (Tyagi et al., 2009). O comportamento térmico do coletor é governado pela seguinte equação diferencial parcial (Bhalla et al., 2019):

$$\rho c_p U \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{\partial q_r}{\partial y} \quad (5)$$

A velocidade de escoamento do nanofluido no coletor é dada por U , e ρ , c_p e k são a densidade, o calor específico e a condutividade térmica do nanofluido, respectivamente. A variável dependente é a temperatura (T) e as condições de contorno são dadas por:

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h(T - T_a) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0 \quad (7)$$

$$T|_{x=0} = T_{in} \quad (8)$$

O coeficiente de perdas térmicas é $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bhalla et al., 2019), $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ é a temperatura ambiente, $H = 1 \text{ cm}$ é a espessura do coletor e T_{in} é a temperatura de entrada do coletor. A equação diferencial foi resolvida através do Método das Diferenças Finitas implementado em script desenvolvido no software *MATLAB*.

A partir da solução da Eq. (5), é determinada a temperatura de saída do nanofluido do coletor (T_{out}). Assim, a eficiência térmica (η_{th}) do coletor pode ser obtida por (Duffie et al., 2020):

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{I_0A_c}, \quad (9)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica do nanofluido e A_c é a área de coleta, que foi fixada em 1 m^2 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$). Outro parâmetro de performance importante para o coletor é a eficiência exergética (η_{ex}), que para dispositivos de coleta solar pode ser obtida pelo modelo de Petela (1964):

$$\eta_{ex} = \eta_{th} \frac{1 - \frac{T_a}{T_{out}}}{1 - \frac{4T_a}{3T_s} + \frac{T_a^4}{3T_s^4}}, \quad (10)$$

em que $T_s = 5800 \text{ K}$ (temperatura do sol).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Espectro de Absorção dos Nanofluidos

O campo elétrico na região de uma nanopartícula é aumentado em relação ao campo incidente devido ao fenômeno de ressonância de plasmon de superfície localizado, como mostrado na Fig. 3. Na imagem, que ilustra o comportamento do campo elétrico para uma nanopartícula de TiN com raio de 20 nm iluminada por luz no comprimento de onda de 520 nm, percebe-se que o fator de aumento de campo alcança valores próximos de 3, o que representa um fator de aproximadamente 9 quando é considerada a potência eletromagnética dissipada.

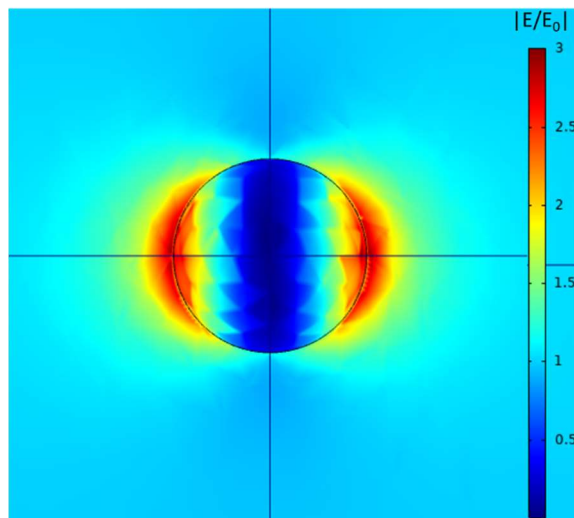


Figura 3 - Campo elétrico nas proximidades de uma nanopartícula de nitreto de titânio. Fonte: Autores.

Para avaliar o desempenho dessas partículas na absorção de radiação solar, a seção transversal de absorção foi calculada para radiação incidente no intervalo entre 300 nm e 1200 nm, como mostrado na Fig. 4. Para fins de comparação, as simulações também foram realizadas para nanopartículas de ouro e prata.

Nota-se que as partículas de nitreto de titânio apresentam seção transversal de absorção com amplitude inferior às amplitudes dos outros materiais analisados. O pico de ressonância das partículas nitreto de titânio ocorre para o comprimento de onda de 520 nm, valor semelhante ao apresentado por partículas de ouro, enquanto que as de prata possuem pico bem definido no comprimento de onda de 400 nm. Apesar da amplitude reduzida, as nanopartículas de nitreto de titânio possuem uma largura de banda de absorção maior que os outros materiais, ocasionando maior compatibilidade com o espectro solar.

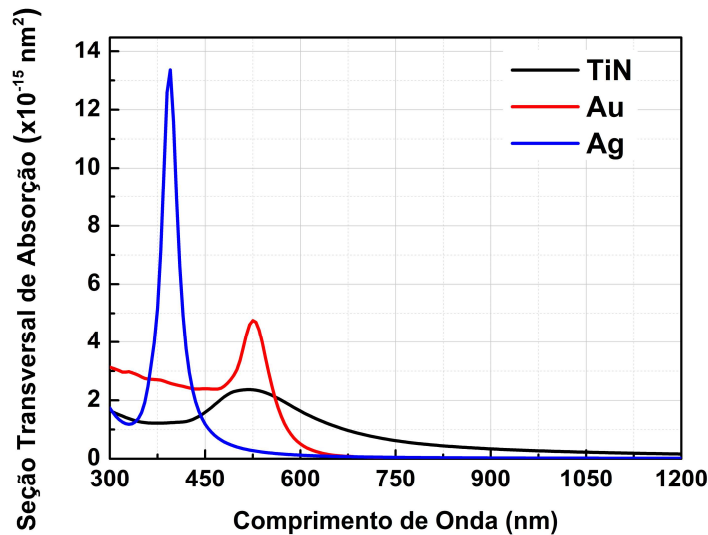


Figura 4 - Seções transversais de absorção para nanopartículas de TiN, Au e Ag com raio de 20 nm. Fonte: Autores.

A fração da radiação solar absorvida pelos nanofluidos é mostrada na Fig. 5 considerando que a concentração volumétrica é de 0,001%.

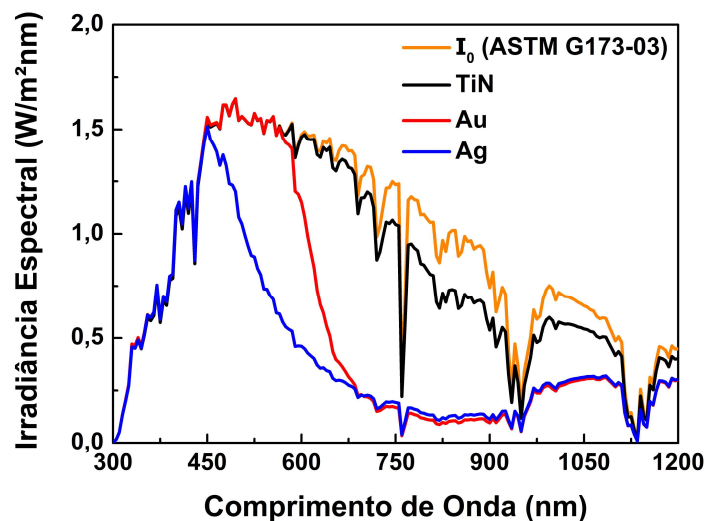


Figura 5 - Absorção da radiação solar pelos nanofluidos de TiN, Au e Ag com concentração volumétrica de 0,001%, espessura $H = 1$ cm e partículas com raio de 20 nm. Fonte: Autores.

Mesmo num regime de baixa concentração, o nanofluido de nitreto de titânio é capaz de absorver 91% da radiação incidente sobre o coletor, enquanto que os nanofluidos de ouro e prata absorvem frações de respectivamente 57% e 45%. Para apresentar desempenho semelhante ao nanofluido de nitreto de titânio, a concentração dos fluidos com ouro e prata necessitam de concentrações da ordem de 100 vezes maior que a de TiN (Vital et al., 2021), o que resulta em custo de produção elevado e maior possibilidade de aglomeração das nanopartículas.

4.2 Performance do Coletor Solar de Absorção Direta

As eficiências energética e exérgica de coletores solares de absorção direta utilizando os nanofluidos analisados estão mostradas na Fig. 6, em função da temperatura normalizada de operação. A vazão mássica foi fixada em 0,02 kg/s para esta análise. Na curva de eficiência da Fig. 6 (a), percebe-se que as inclinações das retas são praticamente idênticas para os três casos, o que é esperado pelo fato dos coletores apresentarem as mesmas características relacionadas às perdas térmicas. A diferença na performance dos coletores é percebida em relação à eficiência energética máxima, que é diretamente afetada pelas características ópticas de absorção dos nanofluidos. A eficiência térmica máxima para o coletor com nitreto de titânio é de 79%, enquanto que os coletores com partículas de ouro e prata apresentam eficiências máximas de 48% e 37%, respectivamente.

O comportamento da eficiência exérgica em função da temperatura, apresentado na Fig. 6 (b), mostra que o coletor utilizando nanofluido de nitreto de titânio exibe um melhor aproveitamento da exergia incidente, com uma eficiência

máxima de 5,2%, em contraste a 2% e 1,2% obtidos com ouro e prata, respectivamente. Os resultados mostram que, além de exibir melhor performance, o coletor com nanofluido de nitreto de titânio é capaz de operar em temperaturas mais elevadas que os coletores com nanofluidos de ouro e prata.

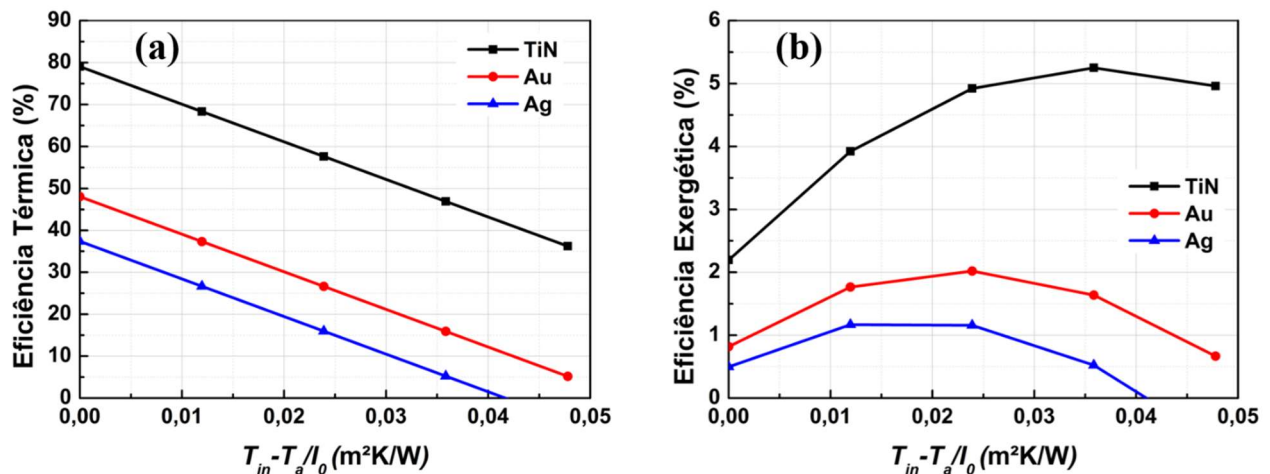


Figura 6 - Eficiência térmica (a) e eficiência exérgica (b) de coletores solares de absorção direta utilizando nanofluidos de TiN, Au e Ag. Fonte: Autores.

A performance do coletor utilizando nanofluido de nitreto de titânio também foi analisada em função da velocidade de escoamento do nanofluido (e , consequentemente da vazão mássica), como mostrado na Fig. 7. Para essa análise, a temperatura de entrada do fluido no coletor foi mantida igual à temperatura ambiente.

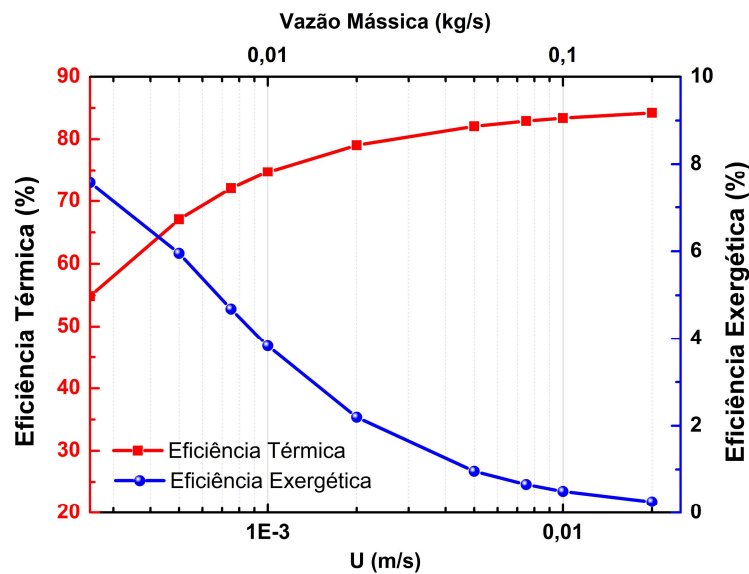


Figura 7 - Eficiência térmica e eficiência exérgica de um coletor com nanofluido de TiN em função da vazão mássica. Fonte: Autores.

Percebe-se que a eficiência térmica aumenta com a vazão mássica, exibindo uma tendência de estabilização no valor de 82% para vazões na faixa de 0,1 kg/s. Por outro lado, o ganho de temperatura é reduzido quando o coletor é submetido a vazões elevadas, o que resulta numa redução da eficiência exérgica do dispositivo nesse regime.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, a performance de um coletor de absorção direta utilizando nanofluido de nitreto de titânio foi analisada numericamente. Esse material plasmônico possui baixo custo quando comparado aos fluidos que utilizam metais nobres na composição e, adicionalmente, apresenta desempenho superior na conversão fototérmica de radiação solar.

O coletor com nanofluido de nitreto de titânio apresenta desempenho consideravelmente superior ao de coletores que utilizam nanofluidos de ouro e prata como fluido de trabalho, mesmo em regime de baixa concentração. Além disso, o coletor exibe versatilidade para aplicações em baixa temperatura, com desempenho satisfatório quando submetido a diversos cenários de temperatura e vazão mássica.

Deste modo, o uso de nanofluido de nitreto de titânio representa um avanço importante para a viabilização de aplicações de coletores solares de absorção direta em grande escala.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Bhalla, V., Khullar, V., Tyagi, H., 2019. Investigation of factors influencing the performance of nanofluid-based direct absorption solar collector using Taguchi method, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, pp. 1493-1505.
- Chen, M., He, Y., Huang, J., Zhu, J., 2017. Investigation into Au nanofluids for solar photothermal conversion, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1894-1900.
- Choudhary, S., Sachdeva, A., Kumar, P., 2020. Influence of stable zinc oxide nanofluid on thermal characteristics of flat plate solar collector, *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 1160-1170.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., Blair, N., 2020. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, John Wiley & Sons.
- Farooq, S., Vital, C. V. P., Gómez-Malagón, L. A., de Araujo, R. E., Rativa, D., 2020. Thermo-optical performance of iron-doped gold nanoshells-based nanofluid on direct absorption solar collectors, *Solar Energy*, vol. 208, pp. 1181-1188.
- Hale, G.M., Querry, M.R., 1973. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region, *Applied Optics*, vol. 12, n. 3, pp. 555-563.
- Johnson, P.B., Christy, R.W., 1972. Optical constants of the noble metals, *Physical Review B*, vol. 6, n. 12, pp. 4370.
- Palik, E.D., 1998. *Handbook of optical constants of solids*, Academic Press.
- Petela, R., 1964. Exergy of heat radiation, *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, n. 2, pp. 187-192.
- Poling, B.E., Thomson, G.H., Friend, D. G., Rowley, R.L., Wilding, W.V., 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook: Section 2*, McGraw-Hill.
- Tyagi, H., Phelan, P., Prasher, R., 2009. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 131, n.4, pp. 041004.
- Vital, C.V.P., Farooq, S., de Araujo, R. E., Rativa, D., Gómez-Malagón, L.A., 2021. Numerical assesment of transition metal nitrides for improved performance of direct absorption solar collectors, *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, pp. 116799.
- Vital, C. V. P., Soares, I. B., Diniz, F. L. J., Gómez-Malagón, L.A., 2018. Eficiência de um coletor solar de absorção direta utilizando nanofluido de prata, VII CBENS – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Vital, C. V. P., Soares, I. B., Gómez-Malagón, L.A., 2016. Eficiência de um coletor termossolar de placas planas usando suspensões de TiO₂ e Al₂O₃, VI CBENS – VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- Xiong, Q., Hajjar, A., Alshuraiaan, B., Izadi, M., Altnji, S., Shehzad, S.A., 2021. State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: A review based on the type of the dispersed nanoparticles, *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, pp. 127528.

PERFORMANCE OF DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTOR USING TITANIUM NITRIDE NANOFLUID

Abstract. *The development of technologies related to solar thermal collectors is fundamental for the progress of a renewable energy matrix. In this context, a recent advance was the use of plasmonic nanofluids in direct absorption solar collectors, which use the working fluid as an element that absorbs solar radiation. The use of this technology, however, is limited by the high cost of noble metals nanofluids. In this work, the performance of a direct absorption collector with titanium nitride nanofluid, which has a reduced cost when compared to noble metals nanofluids, is numerically evaluated. The interaction of nanoparticles with sunlight was investigated by exploring the Finite Element Method in the COMSOL Multiphysics software. The thermal behavior of the collector was evaluated using the Finite Difference Method in the MATLAB software to solve the equation of an energy balance in two dimensions. The evaluation of the collector with titanium nitride nanofluid had as reference parameters the performance of collectors using noble metal nanofluids. The results show that titanium nitride particles exhibit a broader absorption spectrum than noble metals, which results in a better performance of direct absorption collectors using the proposed material. It was found that the thermal efficiency of the collector with titanium nitride nanofluid reaches values of up to 79%, while the collectors with particles of gold and silver have efficiencies limited to 48% and 37%, respectively. In this way, the titanium nitride nanofluid presents itself as a promising material to increase the performance of direct absorption solar collectors.*

Key words: Solar Collector, Nanofluids, Exergy.