

# EFICIÊNCIA DE UM COLETOR SOLAR DE ABSORÇÃO DIRETA UTILIZANDO NANOFLUIDO DE PRATA

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

Isaías Barbosa Soares – ibaso13@gmail.com

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

Luis Arturo Gómez-Malagón – lagomezma@poli.br

Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco – Recife-PE

**Resumo.** *Nanofluidos são suspensões coloidais com alta condutividade térmica que possuem aplicações diversas. Dentre elas, está o seu uso em coletores solares de absorção direta, que usam o próprio fluido de trabalho como absorvedor com a possibilidade de manipular suas propriedades ópticas e termofísicas. Neste trabalho foi modelado e avaliado numericamente um coletor solar de absorção direta utilizando nanofluido composto por partículas esféricas de prata suspensas em água sob regime permanente. Após determinação das características físicas dos materiais empregados no coletor, a equação de balanço energético foi resolvida numericamente através do Método das Diferenças Finitas e do Método de Gauss-Seidel com Relaxação. Os resultados exibiram comportamento da eficiência em função da espessura, fração volumétrica e diâmetro das partículas do coletor compatível com o descrito na literatura para partículas de outros materiais. O coletor solar de absorção direta teve seu desempenho comparado com um coletor de placa plana comercial e mostrou-se compatível com aplicações de baixa temperatura.*

**Palavras-chave:** *Energia Solar, Nanofluidos, Absorção Direta*

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução do desempenho dos coletores solares térmicos tem como um dos seus pilares o desenvolvimento de novos fluidos de trabalho. Levando isso em consideração, nas últimas décadas tem sido avaliado o uso dos nanofluidos em coletores pelo fato deles promoverem uma maior remoção de calor devido às suas propriedades térmicas superiores em comparação aos fluidos tradicionais (Suman, Khan e Pathak, 2015). O termo nanofluido foi empregado pela primeira vez por Choi (1995) para definir suspensões coloidais de alta condutividade térmica contendo partículas de dimensões nanométricas.

O uso de nanofluidos como fluido de trabalho em coletores solares para aplicações em baixas temperaturas foi extensivamente estudado, revelando aumento na eficiência quando comparando ao uso de fluidos tradicionais como água e etilenoglicol (Vital, Soares e Gomez-Malagon, 2016).

Além das aplicações térmicas, esses fluidos são úteis para aplicações médicas e de catálise em reações químicas. Porém, um dos usos mais nobres dos nanofluidos é o aproveitamento das suas propriedades ópticas em combinação com as térmicas para conversão direta de energia solar por meio dos coletores solares de absorção direta.

Os coletores de absorção direta são caracterizados por possuírem o fluido de trabalho em contato direto com a radiação incidente, funcionando como absorvedor. Uma das grandes vantagens desse tipo de coletor é que as características do nanofluido podem ser ajustadas para obter características ópticas que conduzam a um espectro de absorção desejado (Taylor et al., 2013).

Neste trabalho, será modelado e avaliado numericamente um coletor solar de absorção direta utilizando nanofluido de prata com base em água considerando diversos cenários de características do fluido e do coletor, sempre em regime permanente. Posteriormente, o desempenho será comparado com o de um coletor solar de placa plana comercial.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os métodos empregados na modelagem do coletor solar de absorção direta, baseando-se nas propriedades físicas do nanofluido de prata e do vidro utilizado como cobertura, juntamente com o balanço de massa e energia do sistema.

### 2.1 Modelagem do Coletor Solar de Absorção Direta

O Coletor Solar de Absorção Direta pode ser modelado levando em consideração o fluxo do fluido entre duas placas paralelas, sendo a placa superior um vidro que separa o fluido do meio externo permitindo a passagem da

radiação, e a placa inferior que atua isolando o sistema termicamente. Conforme mostrado no diagrama da Fig. 1, o fluido entra no coletor de espessura  $H$  e comprimento  $L$  com temperatura  $T_{in}$  e velocidade média de escoamento  $U$  (dada através da Eq. (1), sendo  $A_i$  a área da seção transversal e  $\rho$  a densidade do nanofluido). São consideradas as perdas por absorção e reflexão no vidro, assim como por convecção e radiação para o ambiente.

$$U = \frac{\dot{m}}{\rho A_i} \quad (1)$$

A velocidade média do escoamento utilizada foi obtida considerando a vazão mássica exigida pela NBR 15747-2 (ABNT, 2009) nos ensaios de eficiência, para posterior comparação com coletores de placa plana tabelados pelo INMETRO.

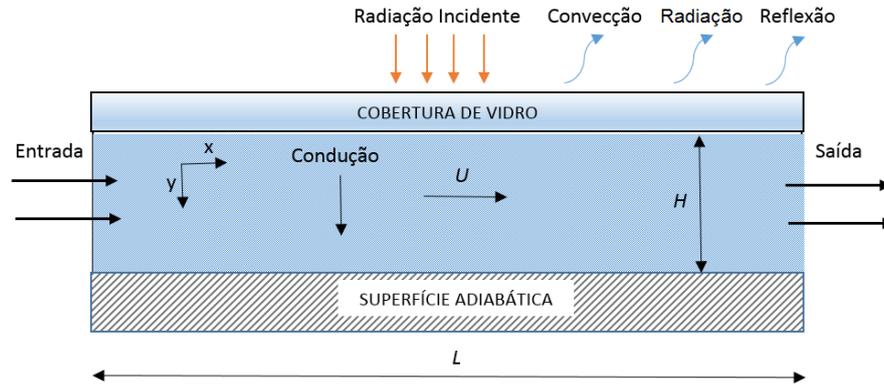


Figura 1 - Diagrama esquemático do Coletor Solar de Absorção Direta

A radiação é absorvida gradualmente pelas nanopartículas presentes no fluido, havendo transporte por condução na direção vertical e transporte convectivo na direção horizontal.

Considerando o sistema como fluxo laminar incompressível sob regime permanente em duas dimensões, o balanço energético é dado por:

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

Onde  $k$  e  $c_p$  são a condutividade térmica e o calor específico do nanofluido, respectivamente.

Considerando a perda por convecção no topo e o fundo adiabático, temos as seguintes condições de contorno para a Eq. (2):

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = h(T - T_{amb}) \quad (3)$$

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=H} = 0 \quad (4)$$

$$T|_{x=0} = T_{in} \quad (5)$$

Na Eq. (3),  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente e o termo  $h$  é o coeficiente de transferência de calor, cujo valor é a soma dos coeficientes de transferência por convecção ( $h_{conv}$ ) e radiação ( $h_{rad}$ ) na seguinte forma:

$$h = h_{conv} + h_{rad} \quad (6)$$

O valor de  $h_{conv}$  empregado foi de  $6,43 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  (Tyagi, Phelan e Prasher, 2009). Pelo fato da área da face superior do coletor ser amplamente maior que a área das laterais (que assim como o fundo são isoladas termicamente), foi considerada a perda por convecção apenas pelo topo.

O coeficiente de transferência por radiação é dado da seguinte forma:

$$h_{rad} = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_{c\acute{e}u}^4)}{T - T_{c\acute{e}u}} = \varepsilon\sigma(T^2 + T_{c\acute{e}u}^2)(T + T_{c\acute{e}u}) \quad (7)$$

Sendo  $\varepsilon$  a emissividade,  $\sigma$  a Constante de Stefan-Boltzmann e  $T_{c\acute{e}u}$  a temperatura do céu, que foi assumida igual à temperatura ambiente, já que essa consideração não afeta significativamente o coeficiente de perdas pelo topo (Duffie e Beckman, 2013) e simplifica o procedimento de cálculo.

O segundo termo do lado esquerdo da Eq. (2) é um termo de geração de calor devido à absorção de radiação pelo nanofluido. Dessa forma, a equação de balanço energético está acoplada à equação de transporte radiativo através do fluxo radiativo assim:

$$\frac{\partial q_r}{\partial y} = \int_{\lambda} I(\lambda, y) d\lambda \quad (8)$$

Onde a intensidade da radiação  $I$  é determinada através da Lei de Lambert-Beer, que considera a atenuação à medida em que a radiação atravessa o nanofluido, e é expressa como:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K_{nanofluido}y} \quad (9)$$

Onde  $K_{nanofluido}$  é o coeficiente de atenuação do nanofluido e  $I_0$  é a radiação que atinge o topo da camada de nanofluido.

Nem toda radiação disponível na cobertura do coletor chega ao nanofluido, já que parte dela é refletida e absorvida pelo vidro.

A refletividade do vidro ( $r$ ) para incidência normal é dada pela equação de Fresnel como (Duffie e Beckman, 2013):

$$r = \left( \frac{n_{vidro} - n_{ar}}{n_{vidro} + n_{ar}} \right)^2 \quad (10)$$

Onde  $n$  é a parte real do índice de refração.

Empregando a Eq. (9) para o vidro, temos que a transmitância do vidro ( $\tau$ ) é dada por:

$$\tau = e^{-\alpha_{vidro}H_{vidro}} \quad (11)$$

Sendo  $\alpha_{vidro}$  o coeficiente de absorção do vidro e  $H_{vidro}$  sua espessura.

Assim, temos que a radiação disponível na superfície do nanofluido ( $I_0$ ) é dada por:

$$I_0 = I_G \tau (1 - r) \quad (12)$$

Onde  $I_G$  é a radiação global disponível, representada pelo espectro AM 1,5 da norma ASTM G173-03 (2012) considerando incidência normal ao coletor.

De posse das soluções das equações de transporte radiativo e do balanço energético, é possível calcular a eficiência global do coletor da seguinte forma:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{I_G A_c} \quad (13)$$

Sendo  $T_{out}$  a temperatura de saída e  $A_c$  a área do coletor.

## 2.2 Propriedades Ópticas do Nanofluido

A fim de obter a solução da equação de transporte radiativo, é necessário conhecer o coeficiente de atenuação do nanofluido, que pode ser obtido através da teoria de absorção de luz por partículas esféricas e espalhamento de Rayleigh, já que as partículas consideradas possuem dimensão reduzida (diâmetro menor que 50 nm) quando comparadas aos comprimentos de onda da radiação do espectro solar. Visando obter boa fidelidade ao modelo, é recomendado utilizar frações volumétricas de no máximo 0,6% (Taylor et al., 2011), devido à aglomeração de partículas (Bohren e Huffman, 1998).

Para substâncias puras ou suficiente homogêneas, o fenômeno de espalhamento pode ser ignorado. Portanto, para o fluido base do nanofluido (água), o coeficiente de atenuação ( $K_{\acute{a}gua}$ ) pode ser calculado como:

$$K_{\text{água}} = \frac{4\pi k'_{\text{água}}}{\lambda} \quad (14)$$

Onde  $k'_{\text{água}}$  é a parte complexa do índice refrativo da água. O mesmo procedimento pode ser adotado para o cálculo do coeficiente de absorção do vidro.

Já para as nanopartículas, o cálculo ocorre através da aplicação das equações de Mie. Para que o procedimento seja válido, é necessário que  $a_t \ll 1$  e  $|m|a_t \ll 1$  (Bohren e Huffman, 1998), sendo  $m$  o índice de refração normalizado e  $a_t$  o parâmetro de tamanho fornecido pela Eq. (15), sendo  $D$  o diâmetro das partículas.

$$a_t = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (15)$$

O índice de refração normalizado é definido como o quociente entre o índice de refração complexo das partículas e o índice de refração do fluido base, da seguinte maneira:

$$m = \frac{n_{\text{partículas}}}{n_{\text{água}}} = \frac{n_{\text{partículas}} + ik'_{\text{partículas}}}{n_{\text{água}} + ik'_{\text{água}}} \quad (16)$$

Sendo  $n$  a parte real e  $k'$  a parte complexa do índice de refração complexo.

Conhecendo esses parâmetros, é possível obter as eficiências de espalhamento ( $Q_s$ ) e absorção ( $Q_a$ ) das partículas (Bohren e Huffman, 1998) como:

$$Q_s = \frac{8}{3} a_t^4 \left| \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right|^2 \quad (17)$$

$$Q_a = 4 a_t \operatorname{Im} \left\{ \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{a_t^2}{15} \right) \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \left( \frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

De posse dos resultados das Eq. (17) e (18), é calculado o coeficiente de atenuação das partículas ( $K_{\text{partículas}}$ ):

$$K_{\text{partículas}} = \frac{3}{2} \left( \frac{f_v (Q_a + Q_s)}{D} \right) \quad (19)$$

Sendo  $f_v$  a fração volumétrica do nanofluido.

Levando em conta a superposição dos efeitos de absorção das partículas e do fluido base, finalmente pode ser obtido o coeficiente de atenuação total do nanofluido  $K_{\text{nanofluido}}$  através da Eq. (20).

$$K_{\text{nanofluido}} = K_{\text{partículas}} + K_{\text{água}} \quad (20)$$

Para efetuar os cálculos, foi realizada obtenção dos dados ópticos ( $n$  e  $k'$ ) em função dos comprimentos de onda para o vidro (Rubin, 1985), prata (Babar e Weaver, 2015) e água (Hale e Querry, 1973).

### 2.3 Propriedades Termofísicas do Nanofluido

A solução do balanço energético dado na Eq. (2) depende também de algumas propriedades termofísicas do nanofluido de prata (condutividade térmica, densidade e calor específico).

A densidade pode ser obtida através da teoria de mistura convencional, levando em conta o balanço mássico na forma da Eq. (21).

$$\rho = (1 - f_v) \rho_{\text{água}} + f_v \rho_{\text{Ag}} \quad (21)$$

Segundo (Rebay, Kakaç e Cotta, 2016), essa forma é bem aceita e possui boa concordância com dados experimentais de diversos estudos.

Para a determinação do calor específico, foi utilizado o modelo proposto por Xuan e Roetzel (2000), mostrado na Eq. (22), que tem sido usado na maioria dos estudos relativos a transferência de calor em nanofluidos e possui bom ajuste com dados experimentais (Riazi et al., 2016).

$$c_p = \frac{[(1 - f_v) \rho_{\text{água}} c_{p,\text{água}} + f_v \rho_{\text{Ag}} c_{p,\text{Ag}}]}{\rho} \quad (22)$$

A determinação da condutividade térmica carece de um modelo único que se ajuste bem aos dados experimentais para nanofluidos diversos. Isso pode ser verificado quando levada em consideração a grande quantidade de modelos desenvolvidos nesse sentido: há mais de 40 entre modelos teóricos e empíricos (Akilu et al., 2016).

Dentre esses modelos, foi escolhido o modelo empírico de Patel, Sundararajan e Das (2010), mostrado na Eq. (23), pelo fato do mesmo apresentar boa concordância com dados experimentais para nanofluidos com partículas metálicas.

$$k = k_{\text{água}} \left[ 1 + 0,135 \left( \frac{k_{\text{água}}}{k_{\text{Ag}}} \right)^{0,273} f_v^{0,467} \left( \frac{T}{20} \right)^{0,547} \left( \frac{100}{D} \right)^{0,224} \right] \quad (23)$$

As propriedades termofísicas da prata foram obtidas nos trabalhos de Kharisov, Kharissova e Ortiz-Mendez (2015) (densidade e condutividade térmica) e Green e Perry (2008) (calor específico). Já as propriedades da água foram determinadas a partir dos modelos empíricos propostos por Azmi et al. (2010). A temperatura de referência foi de 25 °C.

## 2.4 Implementação Numérica

Para solucionar a Eq. (2), foi utilizado o Método das Diferenças Finitas. Os passos escolhidos para as direções vertical e horizontal foram, respectivamente, 0,05 mm e 5 mm. Nas equações que envolvem radiação, o espectro foi dividido em intervalos de 5 nm. Os critérios geração da malha foram a capacidade de fornecer informações detalhadas e a estabilidade do método de solução.

O sistema de equações lineares gerado pela aplicação do método das diferenças finitas foi resolvido através do Método de Gauss-Seidel com Relaxação. O critério de convergência utilizado foi um erro relativo menor que  $10^{-5}$  entre duas iterações. Dessa forma, foi possível obter variações inferiores a 0,01 K entre nós na direção vertical e 0,05 K na direção horizontal.

A implementação foi realizada com auxílio do software MATLAB.

A Tab. 1 mostra os valores de constantes obtidas e utilizadas na realização das simulações.

Tabela 1 - Valores para as variáveis constantes utilizadas nas simulações

Variável	Descrição	Valor	Unidade
$A_c$	Área do Coletor	1,0	m <sup>2</sup>
$H_{\text{vidro}}$	Espessura do vidro	3,0	mm
$r$	Reflectância do vidro	0,04	-
$\tau$	Transmissividade do vidro	0,90	-
$\varepsilon$	Emissividade do vidro	0,95	-
$\rho_{\text{Ag}}$	Densidade da prata	10490	kg m <sup>-3</sup>
$\rho_{\text{água}}$	Densidade da água	997	kg m <sup>-3</sup>
$c_{p,\text{Ag}}$	Calor específico da prata	235	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$c_{p,\text{água}}$	Calor específico da água	4182	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$k_{\text{Ag}}$	Condutividade térmica da prata	429	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$k_{\text{água}}$	Condutividade térmica da água	0,608	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiente	298	K
$T_{\text{in}}$	Temperatura de entrada no coletor	298	K
$h$	Coefficiente de convecção	6,43	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
$m$	Vazão mássica	0,02	kg s <sup>-1</sup>
$I_G$	Radiação Incidente	1000	W m <sup>-2</sup>

Foram realizadas simulações considerando diversos cenários baseados na variação das variáveis diâmetro das partículas (de 5 nm a 25 nm, com passo 5), fração volumétrica (0,001%, 0,01%, 0,1% e 0,6%) e espessura do coletor

(0,5 cm, 1,0 cm e 2 cm), buscando esclarecer seus efeitos na eficiência do coletor de absorção direta. Esses valores foram escolhidos de modo a permitir a avaliação de um coletor com construção factível.

Após a verificação teórica da eficiência do coletor de absorção direta, o mesmo foi comparado com um coletor de placa plana comercial, que teve os dados obtidos através da tabela do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO (2017).

### 3. RESULTADOS

A partir das características físicas do vidro, foi verificado através da Eq. (12) que após a atenuação da radiação pela cobertura, fica disponível para conversão aproximadamente 88% do valor incidente.

Resolvendo as Eqs. (14-20), foi obtido o coeficiente de atenuação para o nanofluido de prata. Para diversos valores de diâmetro e concentração das partículas, foram verificados picos com intensidades diferentes, porém na mesma faixa espectral (próximo a 400 nm). A Fig. 2 mostra o coeficiente de atenuação para fração volumétrica de 0,1% e diâmetro de partícula de 10 nm, em função do comprimento de onda.

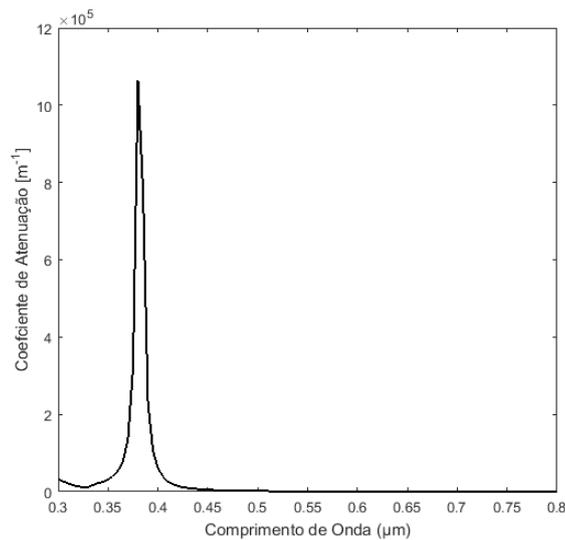


Figura 2 - Coeficiente de Atenuação em função do Comprimento de Onda para nanofluido com  $f_v = 0,1\%$  e  $D = 10$  nm.

Aplicando este resultado na Lei de Beer, foi possível obter a quantidade de radiação disponível ao longo do coletor na direção vertical (eixo  $y$ ), conforme a Fig. 3(a). Nota-se a redução da intensidade nesta direção devido aos efeitos de absorção e espalhamento da luz.

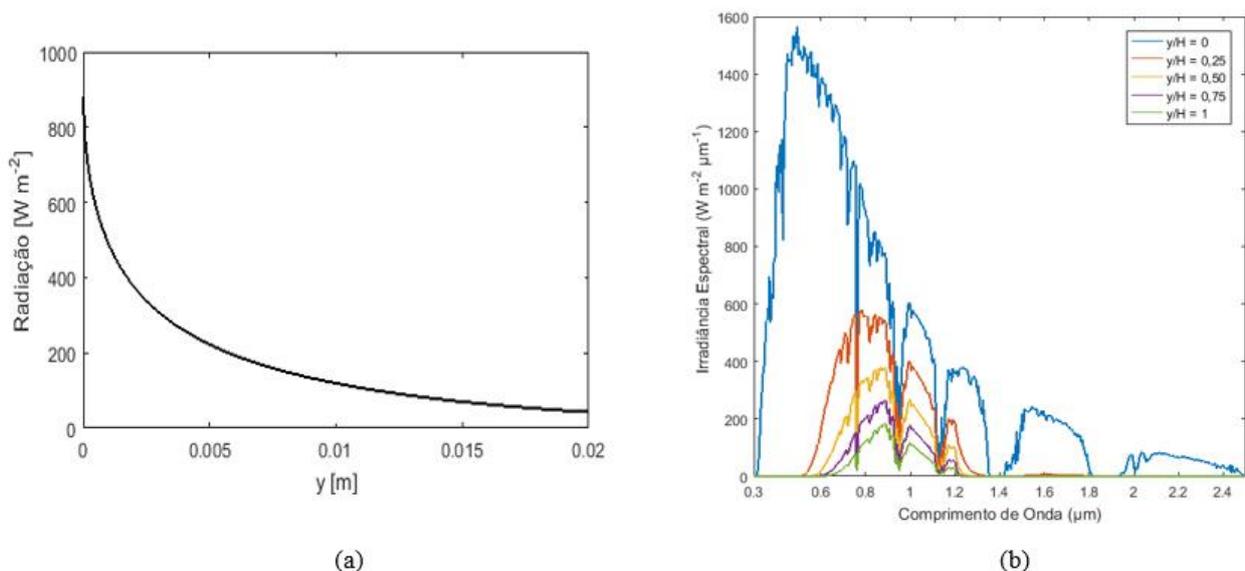


Figura 3 - Disponibilidade de Radiação ao longo do coletor (a) em função de  $y$  e (b) em função do comprimento de onda.

Dessa forma, verificou-se que uma espessura de 2,0 cm é suficiente para absorver 95% da radiação que ultrapassou o vidro da cobertura. Na Fig. 3(b), a intensidade de radiação é mostrada espectralmente para diversas profundidades (considerando  $H = 2,0$  cm). É possível perceber que a maior porção da radiação localizada na faixa espectral próxima ao pico do coeficiente de atenuação é rapidamente absorvida.

Utilizando as informações obtidas para resolver as Eqs. (2) e (13), foram obtidos valores de eficiência em função dos parâmetros variados.

Na Fig. 4, estão mostrados os valores de eficiência em função da fração volumétrica para diferentes valores de espessura do coletor. Como esperado, o aumento na espessura fornece valores maiores de eficiência devido à ocorrência da absorção de uma porção maior de radiação.

Para as espessuras de 0,5 cm e 1,0 cm, o aumento da fração volumétrica ocasionou elevação da eficiência. Para a espessura da 2,0 cm isso também ocorreu, exceto para a fração de 0,6%. Estes resultados foram obtidos para partículas com diâmetro de 10 nm.

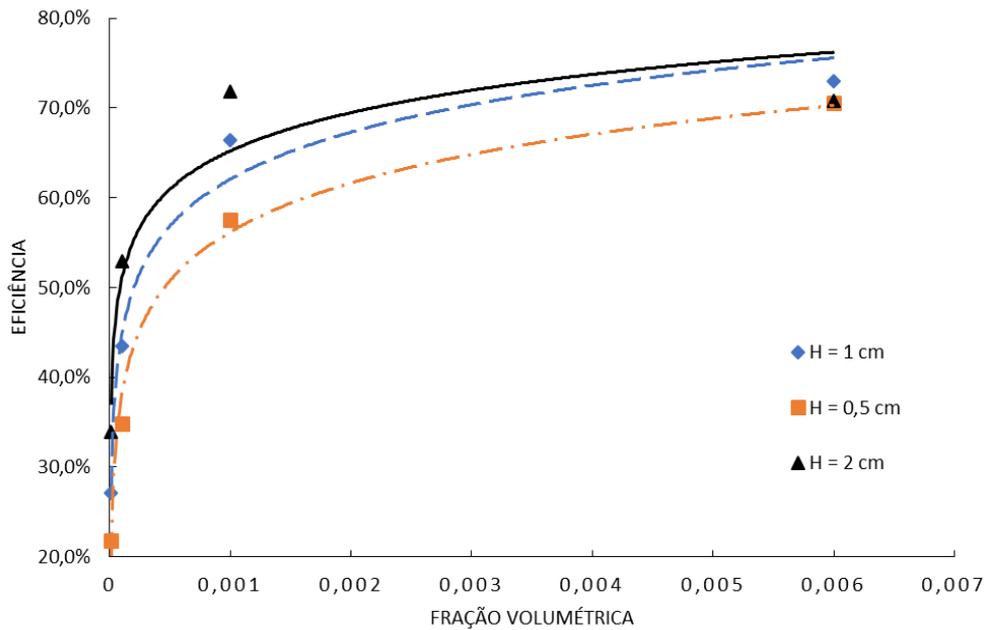


Figura 4 - Eficiência em função da Espessura e da Fração Volumétrica

As curvas representam os ajustes para os pontos através de funções logarítmicas com boa correlação.

Com diâmetro e fração volumétrica fixados em 10 nm e 0,1%, respectivamente, obteve-se o gráfico da eficiência em função da espessura do coletor (Fig. 5), sendo a curva o ajuste dos pontos através de função logarítmica.

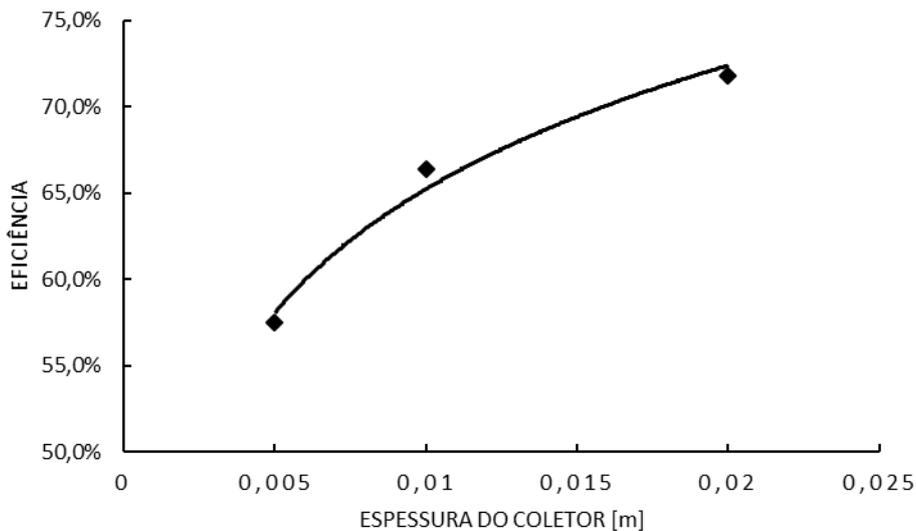


Figura 5 - Eficiência em função da Espessura do Coletor

O efeito da variação do diâmetro das partículas sobre a eficiência do coletor é exibido na Fig. 6.

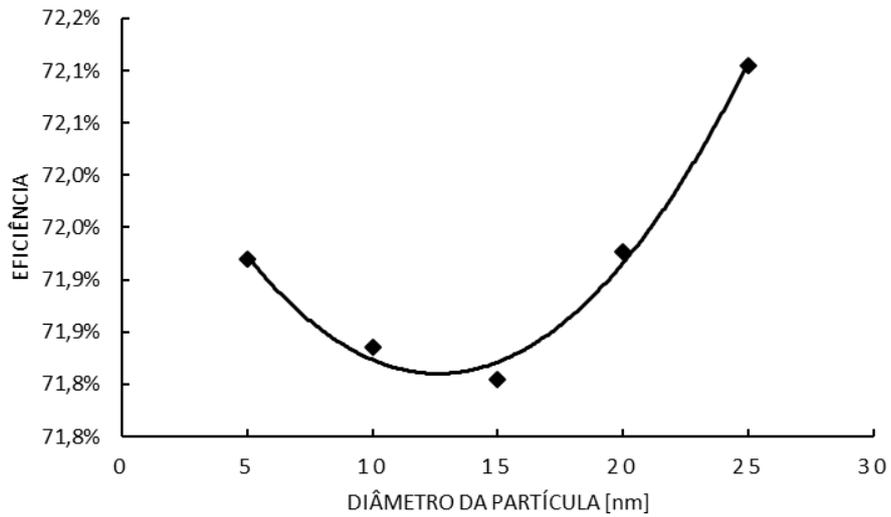


Figura 6 - Eficiência em função do Diâmetro das Partículas

A curva é um ajuste dos pontos utilizando função quadrática.

As limitações de aplicação das equações de Mie impedem a avaliação de partículas maiores (o parâmetro de tamanho se aproxima da unidade).

A distribuição de temperatura num coletor de absorção direta é apresentada na Fig. 7, tendo na região azul escura temperatura próxima à ambiente (25 °C) e na região vermelha a temperatura de 36 °C. A temperatura média do perfil na saída ( $T_{out}$ ) é de aproximadamente 34 °C.

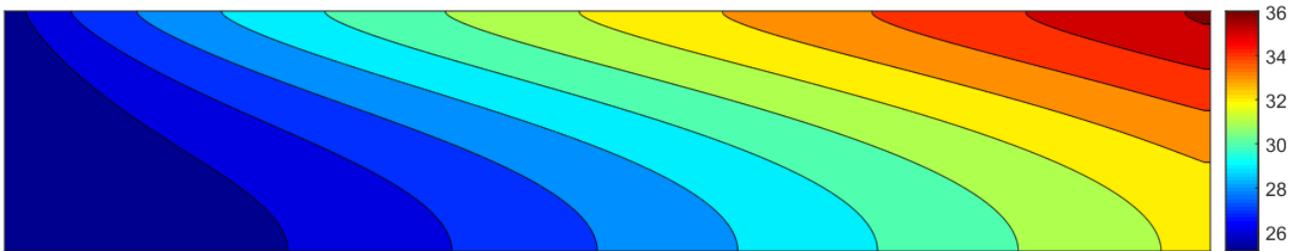


Figura 7 - Perfil de Temperatura de um Coletor Solar de Absorção Direta ( $f_v = 0,1\%$ ;  $D = 10 \text{ nm}$ ;  $H = 2,0 \text{ cm}$ )

Para o coletor exemplificado, foi determinada a curva de eficiência, que posteriormente foi comparada com a de um coletor de placa plana certificado pelo INMETRO com classificação A. A Fig. 8 mostra o gráfico comparativo.

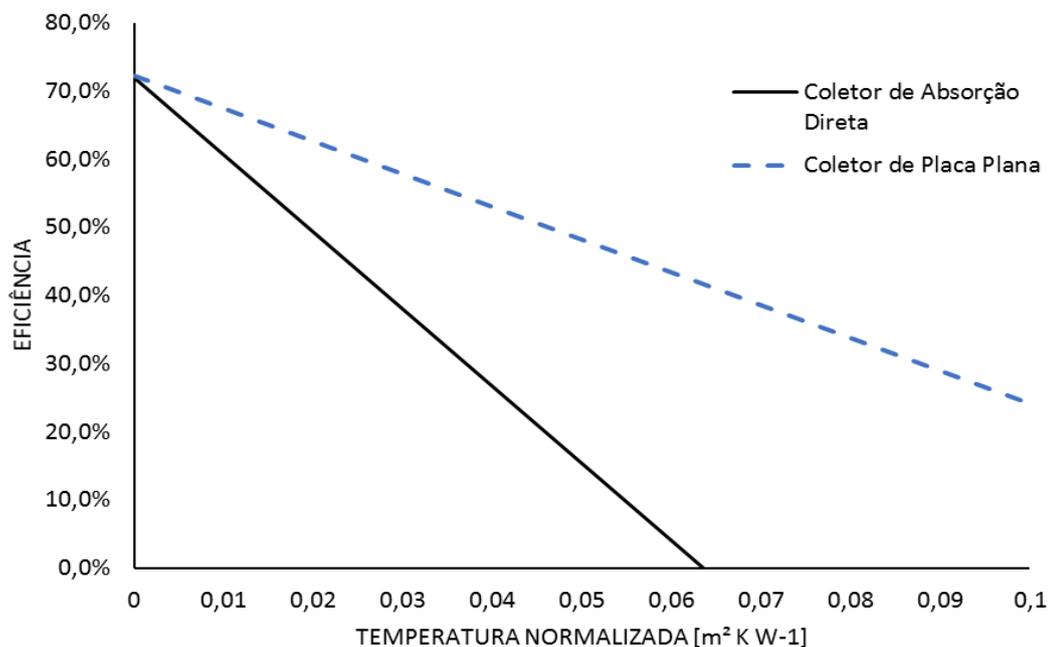


Figura 8 - Gráfico comparando eficiências do Coletor de Absorção Direta e Coletor de Placa Plana Classificação A

A Tab. 2 mostra os parâmetros de eficiência para cada um dos coletores.

Tabela 2 - Parâmetros de Eficiência dos Coletores Analisados

Coletor	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$
Coletor de Absorção Direta	0,718	11,31
Coletor de Placa Plana	0,722	4,80

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado um estudo numérico relativo à eficiência de coletores solares de absorção direta utilizando nanofluido de partículas esféricas de prata em água. A eficiência foi avaliada em função da fração volumétrica, espessura do coletor e diâmetro das nanopartículas.

Os resultados relativos à caracterização óptica do nanofluido (Fig. 2) mostram concordância com as bandas de frequência de plasmon obtidas por Amendola, Bakr e Stellacci (2010) e Rativa e Gómez-Malagón (2015) para partículas esféricas de prata.

Verificou-se um crescimento logarítmico para a eficiência com o aumento da fração volumétrica e da espessura do coletor, em concordância com os resultados teóricos obtidos por Tyagi, Phelan e Prasher (2009) com partículas de alumínio e Parvin, Nasrin e Alim (2014) com partículas de cobre e também com os resultados experimentais obtidos por Vakili et al. (2016) utilizando grafeno e Delfani, Karami e Akhavan-Behabadi (2016) com nanotubos de carbono.

Foi notado efeito discreto do diâmetro das partículas em relação ao desempenho do coletor, conforme verificado por Tyagi, Phelan e Prasher (2009).

O perfil de temperatura do coletor (Fig. 7) demonstra semelhança com os perfis obtidos por Parvin, Nasrin e Alim (2014).

O coletor de absorção direta apresentou desempenho comparável com coletor comercial de classificação A pelo INMETRO apenas para baixas temperaturas, tornando compatível seu uso nesse tipo de aplicação e inviável para temperaturas elevadas devido ao alto índice de perdas nessa faixa.

#### REFERÊNCIAS

- Akili, S. et al., 2016. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 654–678.
- Amendola, V.; Bakr, O. M.; Stellacci, F., 2010. A study of the surface plasmon resonance of silver nanoparticles by the discrete dipole approximation method: Effect of shape, size, structure, and assembly. *Plasmonics*, v. 5, n. 1, p. 85–97.
- Azmi, W. H. et al., 2010. Influence of Certain Thermo-Physical Properties. *Numer 2010*, v. 9501, n. May, p. 502–515.
- Babar, S.; Weaver, J. H., 2015. Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited. *Applied Optics*, v. 54, n. 3, p. 477.
- Bohren, C. F.; Huffman, D. R., 1998. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons.
- Choi, S. U. S.; Eastman, J. A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, v. 66, p. 99–105.
- Delfani, S.; Karami, M.; Akhavan-Behabadi, M. A., 2016. Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid. *Renewable Energy*, v. 87, p. 754–764.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. John Wiley and Sons.
- Green, D. W.; Perry, R. H., 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
- Hale, G. M.; Querry, M. R., 1973. Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- $\mu$ m Wavelength Region. *Applied Optics*, v. 12, n. 3, p. 555.
- INMETRO. PBE - Coletor Solar aplicação Banho e Piscina. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2017.
- Kharizov, B. I.; Kharissova, O. V.; Ortiz-Mendez, U., 2015. *CRC Concise Encyclopedia of Nanotechnology*. CRC Press.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. NBR 14747-2 - Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Parte 2: Métodos de ensaio.
- Parvin, S.; Nasrin, R.; Alim, M. A., 2014. Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 71, p. 386–395.
- Patel, H. E.; Sundararajan, T.; Das, S. K., 2010. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 12, n. 3, p. 1015–1031.
- Rativa, D.; Gómez-Malagón, L. A., 2015. Solar radiation absorption of nanofluids containing metallic nanoellipsoids. *Solar Energy*, v. 118, p. 419–425.

- Rebay, M.; Kakaç, S.; Cotta, R. M., 2016. *Microscale and Nanoscale Heat Transfer: Analysis, Design and Applications*. CRC Press.
- Riazi, H. et al., 2016. Specific heat control of nanofluids : A critical review. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 107, p. 25–38.
- Rubin, M., 1985. Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar Energy Materials*, v. 12, p. 275–288.
- ASTM, 2012. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*. ASTM G173-03.
- Suman, S.; Khan, M. K.; Pathak, M. Performance enhancement of solar collectors - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 192–210, 2015.
- Taylor, R. et al. Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, v. 113, n. 1, 2013.
- Taylor, R. A et al. Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors. *Nanoscale research letters*, v. 6, n. 1, p. 225, 2011.
- Tyagi, H.; Phelan, P.; Prasher, R. Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 131, n. 4, p. 41004, 2009.
- Vakili, M. et al. Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems. *Solar Energy*, v. 131, p. 119–130, 2016.
- Vital, C. V. P.; Soares, I. B.; Gómez-Malagón, L. A., 2016. Eficiência de um coletor termosolar de placas planas usando suspensões de TiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, Brasil.
- Xuan, Y.; Roetzel, W., 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, n. 19, p. 3701–3707.

## EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTOR USING SILVER NANOFUID

**Abstract.** *Nanofluids are colloidal suspensions with high thermal conductivity that have many applications. One of them is its use in direct absorption solar collectors, which use the working fluid itself as an absorber with the possibility of manipulating its optical and thermophysical properties. In this work, a direct absorption solar collector using water based silver nanofluid with spherical particles under steady state condition was modeled and numerically evaluated. After determining the physical characteristics of the materials used in the collector, the energy balance equation was solved numerically through the Finite Differences Method and the Gauss-Seidel Method with Relaxation. The results showed efficiency behavior as a function of thickness, volumetric fraction and particle diameter of the collector compatible with that described in the literature for other kinds of particles. The direct absorption solar collector had its performance compared to a commercial flat plate collector and proved to be compatible for low temperature applications.*

**Key words:** *Solar Energy, Nanofluid, Direct Absorption.*