



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

NANOFLUÍDOS: APLICAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Etevaldo Francisco Carreira Junior, Reynaldo Palacios Bereche

RESUMO

Tem havido intensificação das pesquisas para a utilização da energia solar e seu aproveitamento na forma de calor. Entretanto, coletores solares de placa plana e de tubo evacuado ainda apresentam baixa capacidade de converter energia solar em energia térmica devido a vários fatores, entre eles a baixa condutividade térmica do fluido de troca. Estudos recentes buscam viabilizar o uso de nanofluidos, cujas propriedades termofísicas e condutividade térmica podem melhorar o desempenho dos coletores solares. O objetivo deste artigo é revisar a literatura recente sobre sistemas de aquecimento solar de água, identificando oportunidades de aplicar nanofluidos em coletores solares, visando aumentar a eficiência dos mesmos. A metodologia utilizada foi a revisão de artigos científicos recentes. Os resultados apontam para ganhos acima de 20% na eficiência dos coletores em comparação à utilização de água como fluido de troca, que nanopartículas de carbono apresentam a melhor relação custo-benefício, embora os nanofluidos ainda não sejam viáveis para aplicações reais, pois há desafios a serem superados por essa tecnologia: reduzir a perda de estabilidade, o que diminui sua vida útil, reduzir a complexidade e o custo de obtenção para produção em escala comercial. Conclui-se que há de fato potencial para aplicar nanofluidos em sistemas termosolares.

Palavras-chave: Energia solar. Aquecimento solar. Aquecimento de água. Nanofluidos. Fontes alternativas de energia.

ABSTRACT

There has been intensification of research for the use of solar energy and its use in the form of heat. However, flat plate and evacuated tube solar collectors still have low capacity to convert solar energy to thermal energy due to several factors, including low thermal conductivity of the exchange fluid. Recent studies seek to make feasible the use of nanofluids, whose thermophysical properties and thermal conductivity can improve the performance of solar collectors. The objective of this paper is to review the recent literature on solar water heating systems, identifying opportunities to apply nanofluids to solar collectors, in order to increase their efficiency. The methodology used was the review of recent scientific papers. The results point to gains of more than 20% in the efficiency of the collectors in comparison to the use of water as exchange fluid, that carbon nanoparticles have the best cost-benefit ratio, although nanofluids are not yet feasible for real applications, as there are challenges to

be overcome by this technology: reduce the loss of stability, which reduces its useful life, reduce the complexity and the cost of obtaining for commercial scale production. It is concluded that there is in fact potential to apply nanofluids in solar thermal systems.

Keywords: Solar energy. Solar heating. Water heating. Nanofluids. Alternative energy sources.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento das demandas de energia em todo o mundo, há uma intensificação das pesquisas para a utilização de fontes de energia renovável, dentre elas a energia solar térmica. Em relação ao aproveitamento da energia solar na forma de calor, Sarsam et al. (2015) refere-se aos coletores solares de placa plana como um dos tipos de coletores solares mais amplamente utilizados e conhecidos, mas cuja eficiência é limitada tanto pela placa de absorção do coletor para absorver a energia solar, quanto pela transferência da energia solar para o fluido no coletor. Raj e Subudhi (2018) também se referem ao coletor solar de placa plana como sendo o coletor solar mais usado e menos eficiente, destacando em seu estudo que o uso de nanofluido no lugar do fluido base resulta em melhor desempenho do coletor solar. Kasaeian et al. (2015) reforçam que a nanotecnologia moderna pode produzir partículas metálicas ou não metálicas de dimensões nanométricas que possuem propriedades mecânicas, ópticas, elétricas, magnéticas e térmicas exclusivas e que sua aplicação em sistemas solares oferece vantagens únicas em relação aos fluidos convencionais, também nos coletores solares de tubos evacuados. Verma e Tiwari (2015) salienta que a energia solar tem atraído muito a atenção dos cientistas, interessados principalmente na inovação em novos dispositivos, bem como em desenvolver novos métodos para aproveitá-la, tendo como principais focos a miniaturização de dispositivos e aumento da eficiência energética por meio dos novos materiais, dentre os quais os nanofluidos, uma inovação comparativamente recente que exhibe melhor capacidade de absorção e de transporte de calor.

Sistemas energéticos de transferência de calor dependem de fluidos convencionais como a água, o etileno-glicol ou óleos, os quais apresentam propriedades termofísicas pobres, limitando o desenvolvimento desses sistemas, bem como a sua miniaturização. Estudos sobre a transferência de calor por nanofluidos permitiram identificar relações entre as diferentes variáveis como propriedades termo físicas, fração volumétrica, temperatura e velocidade de escoamento, encontrando-se taxas superiores de transferência de calor por convecção, quando comparadas ao fluido base. A aplicabilidade dos nanofluidos na indústria solar térmica também tem despertado bastante interesse, devido à capacidade dos nanofluidos em absorver a radiação solar. A otimização dos equipamentos de troca de calor depende de três fatores: área de transferência de calor, gradiente de temperaturas e coeficiente de transferência de calor do fluido operante. O aumento da área de transferência de calor é uma estratégia comum para melhorar a eficiência dos trocadores de calor. Contudo, em situações de

restrições ao tamanho e ao peso este tipo de otimização não é viável. A alteração do gradiente de temperaturas apenas permite tornar a transferência de calor mais eficiente, torna-se uma desvantagem, pois requer mais energia para o funcionamento do equipamento. O aumento do coeficiente de transferência de calor do fluido operante, pode ser uma das soluções mais viáveis para a otimização dos equipamentos de troca de calor, por meio da substituição dos fluidos térmicos convencionais por nanofluidos, esperando-se melhora na eficiência dos equipamentos. São inúmeras as possíveis aplicações para as quais os nanofluidos podem ser utilizados, dentre elas o aquecimento solar de água (FERNANDES, 2013).

Muhammad et al. (2016) fez uma revisão de estudos de vários pesquisadores sobre o desempenho térmico de coletores solares térmicos de placa plana, que obtiveram ganhos de eficiência próximos de 20% e potencial de redução da área de coletores de até 25%, quando utilizados nanofluidos obtidos a partir de nanopartículas de diferentes materiais em diferentes percentuais de diluição, na comparação da eficiência ao se utilizar água como fluido de troca de calor. Sharafeldin e Gróf (2018), também identificaram que um coletor solar pode se tornar-se mais econômico, obtendo uma redução da área de superfície em cerca de 20% usando nanofluidos em vez de água como fluido convencional.

Tecnicamente, a integração do sistema de aquecimento solar a um processo produtivo industrial tem certo grau de complexidade e exige disponibilidade de uma área adequada para a instalação dos painéis solares. Estudos de Mekhilef et al. (2011), bem como de Quijera et al. (2011) e de Kulkarni et al. (2008) mencionam a importância do espaço disponível e efetivamente ocupado pelo sistema de coletores e armazenamento na área da fábrica para analisar a viabilidade do sistema.

O objetivo central deste estudo é realizar uma revisão de artigos referentes ao estágio atual de aplicação de nanofluidos em sistemas de aquecimento solar, identificando possibilidades de aumentar a eficiência desses sistemas, buscando a redução da área total necessária de coletores, da redução do espaço ocupado e dos custos para a instalação dos mesmos.

2 Revisão da Literatura

2.1 Nanofluidos

Conforme Muhammad et al. (2016), os nanofluidos são um tipo avançado de fluido contendo uma pequena quantidade de nanopartículas (geralmente menos de 100 nm) uniforme e estavelmente suspensas no líquido. Recentemente, nanofluidos têm sido testados como fluidos de transferência de calor para melhorar o desempenho dos dispositivos coletores solares.

Para Matias (2016), os nanofluidos consistem na dispersão de nanomateriais, como por exemplo, nanopartículas, nanotubos, nanofibras, nanofios, nanofolhas (2D), nanocilindros (3D) ou partículas nanométricas em forma de gotas (*nanodroplets*), em fluidos base, como por exemplo, etileno-glicol (EG),

água, óleos ou até mesmo líquidos iônicos. Após dispersão uniforme formam uma mistura estável e com propriedades diferentes das dos componentes isolados, ou seja, possuem melhores propriedades termo físicas como condutividade térmica, difusividade térmica, viscosidade e coeficientes de transferência de calor por convecção, quando comparados com os respectivos fluídos base. Existem inúmeros tipos de nanomateriais utilizados na preparação de nanofluídos, tais como, materiais metálicos (prata, cobre, alumínio, ferro, níquel, paládio, entre outros) e materiais não metálicos (silício, alumina, grafite, nanotubos de carbono, etc.). Os nanofluídos podem ser preparados por dois métodos:

- Método *two-step*, o mais utilizado, no qual os nanomateriais são previamente transformados em pó por métodos físicos ou químicos, onde as partículas apresentam tamanho nanométrico e depois são dispersos num fluído base, utilizando agitação por ultrassons, agitação de força magnética, dispersão por pressurização, homogeneização ou moinho de bolas. Este o método mais econômico de preparação, mas neste método as nanopartículas têm tendência à aglomeração, podendo ser evitada com a adição de surfactantes com o objetivo de estabilizar os nanofluídos.
- Método *one-step*, cujo intuito é reduzir a aglomeração das nanopartículas, que consiste em produzir e dispersar as nanopartículas no fluído base ao mesmo tempo, eliminando passos como secagem, armazenamento, transporte e dispersão de nanopartículas, reduzindo a aglomeração e aumentando a estabilidade do nanofluído. Este método é bastante eficiente em dispersar uniformemente as nanopartículas, no entanto apresenta elevados custos de produção em escala industrial.

Leong (2016) menciona que a maioria das pesquisas relacionadas ao coletor solar produziu os nanofluídos por meio do método de duas etapas.

Para Fernandes (2013) o estudo da transferência de calor requer conhecimento prévio sobre o melhor método de produção e sobre a estabilidade coloidal do nanofluído para garantir o bom funcionamento dos novos fluídos térmicos, além de requerer conhecimento aprofundado das propriedades térmicas necessárias ao estudo da transferência de calor, como a condutividade térmica, o calor específico e a viscosidade. Este autor detalha as propriedades dos nanofluídos:

- Estabilidade: manter as nanopartículas homogeneamente diluídas no fluído base, mantendo os requisitos de aglomeração reduzida, pouca sedimentação e integridade estrutural para as condições de estudo, o que pode ser obtido pela utilização de ultrassons na preparação de nanofluídos, o controle do PH das nanopartículas e da adição de dispersantes (surfactantes) para evitar sedimentação. Na revisão de trabalhos de outros autores, ele encontrou tempos de estabilidade de nanofluídos de 10 dias, 1 mês, 2 meses, 3 meses e 2 anos, ou seja, resultados muito diferentes entre si. Em seu próprio estudo, Fernandes (2013) previu tempo de vida útil de aproximadamente 4 anos, para nanofluídos com nanotubos de carbono.
- Densidade: é a relação massa por unidade de volume de uma

determinada substância, cujo aumento excessivo nos nanoflúidos aplicados a sistemas térmicos influencia fortemente a capacidade e eficiência de bombeamento em coletores de convecção forçada. A densidade de nanoflúidos varia tendencialmente para um valor superior com a concentração de nanopartículas, e varia inversamente com a temperatura.

- **Calor específico:** é uma grandeza física que define a variação térmica de uma determinada substância ao receber determinada quantidade de calor, o que permite saber a quantidade de energia que um corpo consegue transmitir a outro corpo. O calor específico de um nanofluido depende do calor específico do fluido base e do das nanopartículas, da concentração em volume de nanopartículas e da temperatura. A literatura sugere que o calor específico do nanofluido diminui com o aumento da concentração de volume e aumenta com a temperatura.
- **Viscosidade:** é propriedade crucial no dimensionamento de sistemas com convecção forçada. Um aumento da condutividade térmica é diretamente relacionando com a viscosidade. A análise realizada pelo autor mostra que a viscosidade aumenta com a adição de nanopartículas ao fluido base, em função do aumento da concentração de nanopartículas, havendo também uma diminuição com o aumento da temperatura.
- **Condutividade térmica:** nos nanoflúidos depende de diversos fatores, sendo que ela aumenta linearmente com a concentração volumétrica de nanopartículas bem como com a redução do tamanho médio das nanopartículas. Na Tabela 1 podem ser vistos diferentes variações da condutividade térmica de diferentes nanoflúidos com diferentes concentrações volumétricas, encontradas pelo autor em diferentes estudos de pesquisa.

Tabela 1 – Condutividade térmica de nanoflúidos

Nanofluido	Concentração Volumétrica (%)	Aumento de Condutividade (%)
Cu/EG	0,3	0,50
SiO2/água	1	3,23
SnO2/água	0,024	7
Cu/EG	5	8
MWCNT/água	3	13
Cu/EG	11	16
ZnO/EG-água	10	17
MWCNT/EG	1,5	17
SiO2/água	4	23
CuO/EG-água	10	32
Fe3O4/querosene	1	34
Al2O3/EG-água	10	35
Cu/EG	33	46
Au/água	0,00026	48
Al-Cu/EG	1,5	200

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2013

- **Coefficiente de transferência de calor por convecção (h):** este autor

mostra que este coeficiente é aumentado nos nanoflúidos em comparação com os fluídos base, que a geometria da nanopartícula influencia no coeficiente, sendo maior quando são utilizados nanotubos, e também é maior em nanopartículas de menor tamanho. Na Tabela 2 podem ser vistos valores de do aumento percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção encontrados pelo autor em diferentes estudos de pesquisas, em diferentes tipos de nanoflúidos, com diferentes concentrações volumétricas e diferentes velocidades de escoamento. Verifica-se maior aumento do coeficiente nos nanoflúidos com maior concentração de partículas e para regimes turbulentos de escoamento.

Tabela 2 – Coeficientes empíricos de transferência de calor por convecção

Nanofluido	Concentração volumétrica (%)	Escoamento	Aumento de h (%)
ZrO ₂ /água	1,32	Laminar	3
Al ₂ O ₃ /água	0,3	Laminar	8
TNT/água	2,5	Laminar	13,5
Al ₂ O ₃ -Cu/água	0,1	Laminar	13,56
TiO ₂ /água	1	Turbulento	14
Grafite/água	2	Laminar	22
MWCNT/água	0,12	Laminar	25
TiO ₂ /água	2	Turbulento	26
Al ₂ O ₃ /água	6	Laminar	27
CuO/EG-água	6	Turbulento	35
Al ₂ O ₃ /água	1,6	Laminar	41
MWCNT/água	0,5	Turbulento	47
Cu/água	2	Laminar	60
Cu/água	2	Turbulento	60
MWCNT/água	0,45	Turbulento	159,3

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2013

Trabalhos pesquisados pelo autor verificaram que as correlações clássicas não conseguem prever a transferência de calor para os nanoflúidos. Não há consenso para a determinação do número de Nusselt, embora seja possível afirmar que nanoflúidos têm maior número de Prandtl do que o fluído base, diminuindo com o aumento da temperatura.

2.2 Nanoflúidos aplicados ao aquecimento solar de água

A seguir são apresentados resultados obtidos em diversos experimentos de coletores solares com a utilização de nanoflúidos:

Mahian et al. (2013) revisaram trabalhos anteriores sobre aplicações de nanoflúidos em sistemas solares térmicos, concluindo que a eficiência aumenta para sistemas de circulação bombeada, podendo resultar em economia de eletricidade e combustível. Apontaram como principais desafios à redução do custo dos nanoflúidos devido às dificuldades de produção, superar a questão da aglomeração das nanopartículas em altas temperaturas, o aumento da viscosidade do nanofluido que leva aos aumentos da queda de pressão e da potência necessária ao bombeamento e erosão causada pelas nanopartículas aos sistemas.

Sarsam et al. (2015) revisou investigações do desempenho de coletores solares de placa plana usando nanoflúidos como fluídos de trabalho, a maioria concentrada no uso de nanoflúidos de Al_2O_3 e MWCNT, e alguns outros à base de Ag, TiO_2 , ZnO, Fe_2O_3 , CuO, SiO_2 e SWCNT. As maiores eficiências foram obtidas utilizando nanoflúidos baseados em nanoestruturas de carbono em baixas concentrações das nanopartículas, concluindo-se que as nanopartículas à base de carbono são o tipo mais promissor de nanopartículas dispersas em água em concentrações muito baixas, apresentaram maior estabilidade de dispersão, menor custo, com pequenos aumentos de viscosidade, de queda de pressão e da potência de bombeamento. Nenhuma pesquisa experimental anterior abordou o efeito do uso de surfactantes em temperaturas superiores a $60^\circ C$, em que ocorre o dano da ligação entre o surfactante e as nanopartícula, resultando na perda de estabilidade e no assentamento das nanopartículas. Os desafios mais significativos no uso de nanoflúidos em coletores solares de placas planas podem ser resumidos como o alto custo das nanopartículas, a instabilidade das nanopartículas e o aumento da viscosidade, resultando no aumento da queda de pressão e da potência de bombeamento.

Kasaeian et al. (2015) menciona aumento da eficiência para coletor solar de tubo evacuado utilizando nanoflúidos CuO/água, obtendo aumento de 30% para o coeficiente de transferência de calor por evaporação e também aponta como maior desafio reduzir o custo e desenvolver a produção de nanopartículas.

Beicker (2016) estudou o comportamento de nanoflúidos de ouro e nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersos em água destilada utilizando coletores solares de absorção direta sem concentração construídos pela autora. Em relação à estabilidade, após cinco dias de teste os nanoflúidos de ouro apresentaram indícios de decantação, enquanto os de nanotubos de carbono permaneceram estáveis. Os resultados de energia total armazenada no período de aquecimento, taxa de variação da temperatura, taxa de absorções específica e a razão de energia armazenada confirmaram dados da literatura que afirmam existir para os nanoflúidos uma concentração volumétrica considerada "ótima", acima da qual se torna indiferente ou inviável a adição de nanopartículas, sendo que a concentração volumétrica ideal para aplicações estudadas foi de 0,004% para as nanopartículas de ouro e 0,001% para os nanotubos de carbono. Os testes indicaram que como o alto custo de produção de nanopartículas de ouro e a visível degradação das amostras após exposição prolongada à radiação solar, a dispersão de nanotubos de carbono em água seriam mais viáveis para aplicações de conversão foto térmica.

Muhammad et al. (2016) revisou trabalhos aplicações de nanoflúidos em coletores solares de tubo evacuado, encontrou resultados de aumento de eficiência do coletor em 16,75% e 42,5% utilizando nanoflúido de óxido de titânio à base de água e de 71,84% com nanotubos de carbono, do que operando apenas com água. Estudos com nanotubos de carbono em coletor solar de tubo em U apresentaram aumento de eficiência de 62,8%, bem maior

do que o aumento apresentado por nanoflúidos à base de Al_2O_3 , CuO , SiO_2 e TiO_2 . Outro estudo utilizando nanofluido CuO /água em coletor de tubo evacuado apresentou desempenho térmico aumentado em cerca de 30% em comparação com o da água deionizada. Ele também alertando que os principais desafios dos nanoflúidos para dispositivos solares são principalmente o alto custo do nanofluido devido a limitações de produção, a instabilidade e a aglomeração de nanopartículas, bem como energia de bombeamento e queda de pressão.

Leong (2016) revisou pesquisas e destaca os principais desafios a serem superados a aplicação de nanoflúidos em coletores solares: a perda de estabilidade dos nanoflúidos no decorrer do tempo permanece sem solução, o que impede a comercialização de nanoflúidos; o aumento da viscosidade pela adição de nanopartículas no fluido base resulta na necessidade de maior potência de bomba para operar o coletor, aumentando o custo de operação do sistema, o que pode não ser problema se a economia de energia devido à melhora da eficiência do coletor solar for muito maior do que o custo de operação, o que deve ser levado em conta em uma análise técnico-econômica.

Elsheikh et al. (2017) identificou em trabalhos de investigação dos avanços nas aplicações de nanoflúidos em sistemas de energia solar que as propriedades físicas superiores dos nanoflúidos resultam em um aprimoramento significativo no processo de transferência de calor, que por sua vez resulta na redução do tamanho dos dispositivos solares. Entretanto, também identificou como desafios a serem superados evitar a degradação de surfactantes e a aglomeração de nanopartículas para aplicações de alta temperatura e a redução do custo de produção dos nanoflúidos. Problemas identificados foram a divergência nos resultados obtidos por diferentes pesquisadores e a falta de estudos de aplicações da vida real.

Iranmanesh et al. (2017) investigou experimentalmente o efeito de nanoflúidos de grafeno em fluido base água destilada no desempenho térmico de coletor solar de tubo evacuado resultando que a eficiência térmica do coletor solar aumentou com o uso de nanoflúidos de grafeno com diferentes concentrações. A eficiência térmica do sistema foi aumentada para 90,7% tendo ficado 35,8% acima da eficiência da água destilada. Os resultados indicaram que, aumentando a porcentagem de massa das nanopartículas, o ganho de energia térmica também aumenta, atingindo uma temperatura de saída mais alta do fluido quando *nanosheets* (folhas) de grafeno são usados.

Verma et al. (2017) realizaram analisaram uma ampla variedade de nanoflúidos em coletor solar de placa plana. Os resultados do experimento apontam aumento na eficiência exérgica e consequentemente energética dos nanoflúidos com nanotubos de carbono é o maior em 29,32% e 23,47%, respectivamente, em comparação com a água do fluido base. O aumento na eficiência exérgica de outros nanoflúidos foi de 21,46% em grafeno, 16,67% em cobre, 10,86% em alumínio, 6,97% em titânio e 5,74% em nanoflúidos à base de óxido de silício. O incremento na eficiência energética foi de 16,93%

para grafeno, 12,64% para cobre, 8,28% para alumínio, 5,09% para titânio e 4,08% para óxido de silício. Um coletor solar pode se tornar uma proposição econômica, tornando-o mais compacto, reduzindo a área de superfície em cerca de 20% e usando nanoflúidos com nanotubos de carbono/água em vez de água fluida convencional. Os autores também destacam desafios a serem superados, quanto ao custo, produção em massa, estabilidade e mecânica do comportamento das nanopartículas no fluido base.

Zeiny et al. (2018), realizou um experimento em um simulador solar de alta qualidade a partir do conceito de absorção direta, utilizando nanoflúidos de ouro, cobre, de negro de fumo e seus híbridos, para avaliar seu desempenho em termos de eficiência de conversão foto térmica, taxa de absorção específica e custo de materiais. O estudo revelou que embora os nanoflúidos de ouro tenham uma taxa de absorção específica elevada, o seu custo dispendioso limita a sua utilização prática, enquanto os nanoflúidos de negro de fumo são mais viáveis.

Raj e Subudhi (2018) revisaram vários trabalhos sobre a aplicação de nanoflúidos em dispositivos solares térmicos, tendo constatado melhora na condutividade térmica em coletores solares. A maioria das pesquisas centrou-se nos placa plana e de absorção direta. Desafios e dificuldades apontadas são principalmente o alto custo de nanopartículas (o método de preparação do nanofluido é dispendioso e moroso); nanofluido não é estável por um longo período de tempo; a adição de nanopartículas no fluido base aumenta a viscosidade, aumentando a queda de pressão, sendo necessária maior potência de bombeamento; o uso contínuo do nanofluido em longo prazo pode causar erosão das paredes na tubulação dos coletores. As conclusões mais importantes indicam que a dispersão adequada de nanopartículas e estabilidade em longo prazo são necessárias para aumentar a eficiência do coletor solar, a eficiência do coletor aumenta com o aumento da fração volumétrica mas com o aumento adicional a eficiência diminui porque as forças viscosas aumentam e a taxa de transferência de calor diminui.

Mahbubul et al. (2018) realizou estudo para analisar o efeito do nanotubo de carbono de parede única no desempenho de um sistema coletor solar de tubos evacuados, inicialmente operado com água. O sistema de 14 coletores ocupou uma área de 116m², com área efetiva de 42m², com refletores embutidos na parte inferior de cada unidade de coletor solar para ganhar mais calor. Os resultados indicaram eficiência 56,7% quando o sistema é operado com água e 66% quando operado com nanofluido. A temperatura de saída máxima foi de 120,6°C. Dentre os demais autores citados anteriormente neste trabalho, este foi o único sistema dessa dimensão encontrado, pois se tratava de um sistema real instalado, sendo que os demais utilizaram sistemas experimentais reduzidos.

Sharafeldin e Grof (2018) realizaram estudo da utilização de nanofluido CeO₂ e fluido base água em coletor solar de tubo evacuado. O nanofluido utilizado foi produzido pelos autores. O trabalho conclui que o aumento máximo da diferença de temperatura é de 37,3% no uso de nanofluido CeO₂ se

comparada à água no mesmo fluxo de massa. O ganho de calor útil aumentou com o uso de nanoflúidos. Além disso, quanto mais nanopartículas de CeO₂ adicionadas à água, mais calor foi absorvido. Com base nisso, a elevação máxima do ganho de calor foi maior em 42,3% do que o ganho de calor no caso da água para. O aumento máximo do fator removível pelo calor foi encontrado 34,66% comparação com a água na mesma taxa de fluxo massivo.

3 CONCLUSÕES

Coletores solares de placa plana são os tipos mais amplamente utilizados e conhecidos, tendo eficiência limitada e aquece o fluído apenas em baixas temperaturas, ou seja, entre 60°C e 80°C, tendo por fluído base água. Coletores solares de tubo evacuado são mais eficientes do que os de placa plana, possibilitando aquecer o fluído até cerca de 120°C e 150°C, tendo por fluído base água. A aplicação de coletores solares para aquecimento tem limitações de eficiência, o que exige grandes áreas coletoras para sistemas que devam atender grandes demandas de água quente, por exemplo, nas indústrias.

A revisão da literatura mostra que nanoflúidos poderiam substituir fluídos convencionais nos coletores solares, e, devido ao aumento da condutividade térmica do fluído, poderiam aumentar a eficiência térmica dos coletores, resultando em aumento da temperatura final do fluído ou redução da área dos coletores. Estudos recentes mostram que com nanoflúidos poderia haver ganhos acima de 20% ou 30% na eficiência dos coletores em comparação à utilização de água como fluído. Foi possível identificar que apesar de os autores terem realizado experimentos com nanopartículas de diferentes materiais, aqueles que apresentaram a melhor relação de resultados e menores custos foram as nanopartículas de carbono, principalmente nanotubos e carbono e grafeno. Há que se observar que, exceto para um dos estudos relatados, os experimentos foram realizados em coletores solares de pequena dimensão ou simuladores e que as nanopartículas foram produzidas pelos próprios autores dos estudos, bem como há diferença de procedimentos entre eles, o que pode gerar certa inconsistência nos dados obtidos por diferentes pesquisadores.

Entretanto, ainda existem vários e grandes desafios a serem superados para a utilização de nanoflúidos em escala industrial:

A produção de nanoflúidos ainda depende de processos e equipamentos relativamente complexos e especializados, o que dificulta a sua produção em escala industrial.

Quanto à vida útil do nanofluído, não é possível uma previsão muito precisa, uma vez que foram poucos os estudos realizados nesse sentido e não há consenso quanto à vida útil dos nanoflúidos testados. Com o passar do tempo e principalmente devido a temperaturas elevadas, as nanopartículas tendem a se aglomerar ou a decantar, alterando as características do nanofluído homogêneo, sobretudo a estabilidade. A vida útil está diretamente

relacionada à frequência da necessidade de troca do fluido do sistema térmico, representando gastos adicionais à operação.

Nanoflúídos apresentam viscosidade maior do que o fluido base, o que resulta em perda de pressão no bombeamento e na necessidade de maior potência de bombeamento, resultando em mais um fator de aumento do custo de operação do sistema, que só será compensado se o aumento de eficiência térmica representar um ganho superior em economia. Além disso, a longo prazo as nanopartículas podem causar erosão das paredes na tubulação dos coletores.

Assim, embora os nanoflúídos representem uma grande oportunidade de melhoria de operação dos sistemas de aquecimento solar, eles ainda não são viáveis para aplicações reais, pois ainda não são produzidos em escala comercial, têm problemas de estabilidade, não se pode prever com segurança o tempo de vida útil dos mesmos e ainda devido ao aumento da viscosidade do fluido térmico provocado pelas nanopartículas, o custo de bombeamento para a circulação do fluido aumenta, diminuindo a viabilidade dos sistemas.

Este estudo pode contribuir para a produção de nanoflúídos em escala comercial, indicando os aspectos técnicos e econômicos a serem superados através de novos estudos, com vistas a melhorar o desempenho dos coletores solares com a redução da área de coletores necessária aos sistemas de aquecimento solar, visto que nem sempre há espaço suficientemente disponível para a sua instalação, além de que espaço tem custo.

REFERÊNCIAS

BEICKER, Carolina Lau Lins. Análise experimental da conversão foto térmica em nanoflúídos de ouro e nanotubos de carbono em água. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

ELSHEIKH, A. H. et al. Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

FERNANDES, Fábio Alexandre Teixeira. Caracterização da transferência de calor em nanoflúídos. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

IRANMANESH, Soudeh et al. Thermal performance enhancement of an evacuated tube solar collector using graphene nanoplatelets nanofluid. *Journal of cleaner production*, v. 162, p. 121-129, 2017.

KASAEIAN, Alibakhsh; ESHGHI, Amin Toghi; SAMETI, Mohammad. A review on the applications of nanofluids in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 584-598, 2015.

KULKARNI, Govind N.; KEDARE, Shireesh B.; BANDYOPADHYAY, Santanu. Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications. *Solar Energy*, v. 82, n. 8, p. 686-699, 2008.

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

LEONG, K. Y. et al. An overview on current application of nanofluids in solar thermal collector and its challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1092-1105, 2016.

MAHBUBUL, I. M. et al. Carbon nanotube nanofluid in enhancing the efficiency of evacuated tube solar collector. *Renewable Energy*, 2018.

MAHIAN, Omid et al. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 57, n. 2, p. 582-594, 2013.

MATIAS, Inês Andreia Simão. Nanoflúidos para aplicações energéticas. 2016. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

MEKHILEF, Saidur; SAIDUR, Rahman; SAFARI, Azadeh. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 1777-1790, 2011.

MUHAMMAD, Mahmud Jamil et al. The use of nanofluids for enhancing the thermal performance of stationary solar collectors: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 63, p. 226-236, 2016.

MUHAMMAD, Mahmud Jamil et al. Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: a review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 76, p. 6-15, 2016.

QUIJERA, José Antonio; ALRIOLS, María González; LABIDI, Jalel. Integration of a solar thermal system in a dairy process. *Renewable Energy*, v. 36, n. 6, p. 1843-1853, 2011.

RAJ, Pankaj; SUBUDHI, Sudhakar. A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 84, p. 54-74, 2018.

SARSAM, Wail Sami; KAZI, S. N.; BADARUDIN, A. A review of studies on using nanofluids in flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, v. 122, p. 1245-1265, 2015.

SHARAFELDIN, M. A.; GRÓF, Gyula. Evacuated tube solar collector performance using CeO₂/water nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, v. 185, p. 347-356, 2018.

VERMA, Sujit Kumar; TIWARI, Arun Kumar. Progress of nanofluid application in solar collectors: a review. *Energy conversion and management*, v. 100, p. 324-346, 2015.

VERMA, Sujit Kumar; TIWARI, Arun Kumar; CHAUHAN, Durg Singh. Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids. *Energy conversion and management*, v. 134, p. 103-115, 2017.

ZEINY, Aimen et al. A comparative study of direct absorption nanofluids for solar thermal applications. *Solar Energy*, v. 161, p. 74-82, 2018.