UMA REVISÃO SOBRE NANOFLUIDOS: MÉTODOS DE PREPARAÇÃO E APLICAÇÕES

A REVIEW ON NANOFLUIDS: PREPARATION METHODS AND APPLICATIONS

ROCHA, Paulo Alexandre Costa^{1*}; SANTOS, Rogério Feliciano de Moura²; LIMA, Ricardo José Pontes³; SILVA, Maria Eugênia Vieira da⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, Rua Professor Armando Farias, 713, CEP 60020-181, Fortaleza – CE, Brasil
(fone: +55 85 3366 9881; fax: +55 85 3366 9881)

* Autor correspondente
e-mail: paulo.rocha@ufc.br

Received 12 November 2018; received in revised form 29 November 2018; accepted 05 January 2019

RESUMO

Pesquisas em transferência de calor utilizando suspensões de partículas sólidas de tamanho nanométrico em líquidos como fluido de base começaram nas últimas duas décadas. O nanofluido trata-se de uma mistura coloidal composta de um fluido base e de nanopartículas. As nanopartículas podem ser metálicas, não-metálicas, cerâmicas, óxidos e de várias outras categorias, sendo os nanocompósitos uma das áreas de maior crescimento na engenharia de materiais. Os nanofluidos fazem parte de uma nova geração de fluidos de alto potencial em aplicações de transferência de calor devido à sua maior condutividade térmica. Os estudos mais recentes sobre nanofluidos indicam que as nanopartículas suspensas alteram marcadamente as propriedades e as características de transferência de calor da suspensão. Este artigo resume alguns dos recentes avanços no estudo de nanofluidos e nanopartículas, tais como os métodos de preparação, as suas propriedades termofísicas e finalmente apresenta vários campos de aplicações como aplicações solares térmicas, mecânicas, automotivas, eletrônicas, médicas, biomédicas etc.

Palavras-chave: nanopartículas, investigação experimental, engenharia de materiais, transferência de calor

ABSTRACT

Research in heat transfer using suspensions of nanometer-sized solid particles in liquids as the base fluids have started in the last two decades. The nanofluid is a colloidal mixture composed of a base fluid and nanoparticles. The nanoparticles may be metallic, nonmetallic, ceramic, oxide and of several other categories, being the nanocomposites one of the areas of greater growth in the engineering of materials. Nanofluids are part of a new generation of high potential fluids in heat transfer applications due to their higher thermal conductivity. Most recent studies on nanofluids indicate that suspended nanoparticles markedly alter the properties and heat transfer characteristics of the suspension. This article summarizes some of the recent advances in the study of nanofluids and nanoparticles, such as their preparation methods, their thermophysical properties and finally presents various fields of applications such as solar thermal, mechanical, automotive, electronic, medical, biomedical etc.

Keywords: nanoparticles, experimental investigation, materials engineering, heat transfer

1. INTRODUÇÃO

A energia é um dos principais fatores referentes ao crescimento e desenvolvimento econômico de qualquer país. O aprimoramento do processo de transferência de calor nos sistemas de energia é um dos quesitos mais relevantes para alcançar um melhor desempenho desses sistemas com projetos compactos (Elsheikh *et al.*, 2018).

A inovadora tecnologia de materiais permitiu produzir uma nova classe de fluidos de transferência de calor conhecidos como nanofluidos. Os nanofluidos são materiais compósitos sólidos e líquidos criados por suspensão de materiais sólidos de tamanho nanométrico em fluidos de base. Em outras palavras, os nanofluidos são suspensões coloidais de nanoescala contendo nanomateriais condensados. Os nanofluidos têm demonstrado um grande potencial de aplicações em vários campos. (Yu e Xie, 2012).

As nanopartículas podem ser metálicas, não metálicas, óxidas, carbonetos, cerâmicas, carbonatos, nanopartículas híbridas e até mesmo gotas líquidas de nanoescala (Fuskele e Sarviya, 2017). Os nanocompósitos, isto é, compósitos que contêm duas partículas dispersas diferentes na faixa de nanômetros, são uma parte significativa da nanotecnologia e uma das áreas de maior crescimento na ciência e engenharia de materiais (Suresh *et al.*, 2011).

As nanopartículas são geralmente classificadas com base na sua morfologia, dimensionalidade, composição, uniformidade e aglomeração. Com base na morfologia, as nanopartículas podem ser estruturais planas, esféricas e cristalinas (Fariq *et al.*, 2017). Em relação à dimensionalidade, as nanopartículas podem ser classificadas como unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. As nanopartículas unidimensionais incluem filmes finos utilizados em dispositivos eletrônicos e sensoriais. As nanopartículas bidimensionais incluem nanotubos de carbono que possuem alta capacidade de adsorção e estabilidade. As nanopartículas tridimensionais contêm dendrímeros, pontos quânticos (Pal *et al.*, 2011).

Os nanofluidos híbridos são novos tipos de nanofluidos, que podem ser preparados suspendendo duas ou mais nanopartículas no fluido base. Uma nanopartícula híbrida é uma substância que combina propriedades físicas e

químicas dos materiais constituintes simultaneamente e fornece essas propriedades em uma fase homogênea (Devendiran e Amirtham, 2016).

O objetivo deste artigo traz como enfoque uma revisão acerca dos nanofluidos, explicitando e exemplificando os métodos de preparação e todas as etapas que os englobam, bem como o estudo das suas propriedades termofísicas e as novas tendências de aplicações práticas em diversos campos da ciência. No entanto, ainda há muitos desafios que precisam ser superados. Uma discussão acerca desses desafios está contida ao fim desta revisão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A preparação de nanofluidos é o primeiro passo chave em estudos experimentais com nanofluidos. O nanofluido não é simplesmente uma mistura líquida/sólida e, por isso, necessita na sua preparação de requisitos especiais, como uma suspensão uniforme, suspensão estável, baixa aglomeração de partículas e nenhuma alteração química do fluido. A alteração do pH da suspensão, o uso de ativadores de superfície ou dispersantes, bem como o uso de vibração ultrassônica, são algumas sugestões para se estabilizar as suspensões (Xuan e Li, 2000). Existem principalmente duas técnicas usadas para produzir nanofluidos: o método de um passo e de dois passos.

2.1. Técnica de Um Passo

A técnica de um passo combina a produção de nanopartículas e a dispersão de nanopartículas no fluido base em um único passo. Neste método, os processos de secagem, armazenamento, transporte e dispersão de nanopartículas são evitados, de modo que a aglomeração de nanopartículas é minimizada e a estabilidade dos fluidos aumenta (Li *et al.*, 2009).

Em um dos métodos comuns, chamado método de evaporação direta de um passo, o nanofluido é produzido pela solidificação das nanopartículas, que estão inicialmente em fase gasosa, dentro do fluido base. A abordagem de evaporação direta de um único passo foi desenvolvida por Akoh *et al.* (1978) e é chamada de evaporação de vácuo para uma técnica de substratos de óleo corrente (VEROS).

Choi e Eastman (2001) produziram um

nanofluido com partículas de cobre nanocristalinas dispersas, utilizando um método de preparação com base na técnica VEROS. O cobre nanocristalino foi evaporado de forma resistiva em dois tipos de óleo de bomba. As partículas nanocristalinas são produzidas por evaporação direta em um líquido de baixa pressão de vapor. Um cilindro é submetido a um vácuo. O cilindro contém uma placa aquecedora que aquece a substância a ser vaporizada. O cilindro contendo o líquido a ser tratado é rotacionado para transportar uma fina camada do líquido na superfície. O líquido é arrefecido por um sistema de refrigeração para evitar que este aumente a pressão de vapor dentro do cilindro.

O método físico de um passo tem como limitação não poder sintetizar nanofluidos em grande escala, e o seu custo também é alto, como consequência disto, o método químico de um passo está se desenvolvendo rapidamente. Zhu *et al.* (2004) apresentou um método de síntese química de um passo para preparar nanofluidos de nanopartículas de cobre dispersas em etilenoglicol. O experimento consistiu na mistura de 25 ml de solução de etilenoglicol de sulfato de cobre penta-hidratado com 5 ml de solução de etilenoglicol de polivinilpirrolidona num copo de 100 ml, seguido de agitação magnética durante 30 minutos. Em seguida, adicionou-se 25 ml de solução de etileno glicol de hipofosfito de sódio e agitou-se durante mais 15 minutos. A mistura foi colocada em um forno de microondas para reagir por 5 minutos sob potência média. A cor da mistura passou de azul a vermelho escuro após a reação. Depois de arrefecer até à temperatura ambiente, obteve-se o nanofluido de cobre.

2.2. Técnica de Dois Passos

O método de dois passos é o método mais utilizado para a preparação de nanofluidos. Nanopartículas, nanofibras, nanotubos ou outros nanomateriais utilizados neste método são primeiramente produzidos como pós secos por métodos químicos ou físicos. Em seguida, o pó nanométrico será disperso em um fluido no segundo passo de processamento com a ajuda de agitação de força magnética intensiva, agitação ultrassônica, mistura de alto cisalhamento, homogeneização e moagem de bolas. O método de duas etapas é o método mais econômico para produzir nanofluidos em larga escala, porque as técnicas de síntese de nanopulsão já foram ampliadas para níveis de

produção industrial (Yu e Xie, 2012).

2.3. Síntese de Nanopartículas

A síntese de nanopartículas é o primeiro passo para a preparação de nanofluidos no método de dois passos. As nanopartículas podem ser sintetizadas usando várias abordagens, incluindo químicas, físicas e biológicas (Fuskele e Sarviya, 2017). Algumas abordagens para sintetizar nanopartículas são discutidas a seguir.

Deshmukh *et al.* (2013) sugeriram um novo método para sintetizar nanopartículas em forma de agulha de cobalto (aciculares) bem dispersas em água por uma rota de redução de temperatura ambiente.

Ajitha *et al.* (2013) sintetizaram nanopartículas de prata em forma esférica através de método de redução química usando citrato de tri-sódio como agente redutor e acetato de polivinila como surfactante. Verificou-se que o tamanho das nanopartículas pode ser ajustado simplesmente variando o pH do sistema de reação.

Huminic *et al.* (2015) produziram nanopós de carbeto de ferro (FeC) utilizando a técnica de pirólise a laser a partir de vapores de pentacarbonila de ferro transportados por etileno que também atua como agente de transferência de energia a laser. Resumidamente, a onda contínua de dióxido de carbono ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) irradia ortogonalmente a mistura de fluxo de gás reativo, resultando dessa maneira uma chama, a partir da qual emergem as nanopartículas.

Guzman *et al.* (2015) sintetizaram nanopartículas de cobre a partir de um método de poliol por meio de micro-ondas. Foi dissolvido ácido ascórbico em etilenoglicol, em seguida adicionou-se polivinilpirrolidona. Após a solução ser formada, esta foi agitada e aquecida através de um fluxo de calor constante por equipamentos de micro-ondas adaptado para síntese química. Nesta fase houve a adição de uma solução de acetato de cobre anidro (CuAc_2) em etilenoglicol. Obtém-se um pó avermelhado a partir da centrifugação das nanopartículas de cobre.

Ho *et al.* (2017) relataram a síntese e caracterização de um novo polímero de metalopolíol contendo platina. Foi verificado que este metalopolímero pode atuar como precursor para a síntese de nanopartículas de platina após pirólise. O metalopolímero sintetizado foi

colocado em um barco de cerâmica, que foi então colocado dentro de um tubo de reação de quartzo equipado com controles de temperatura e fluxo de gás. Em seguida, todo o conjunto foi aquecido até 600 °C a uma velocidade de 20 °C por minuto e o metalopolímero foi pirolizado a 600 °C durante 5 h sob uma atmosfera de nitrogênio. Após a pirólise obteve-se partículas finas em pó com seu tamanho situado dentro da gama de nanomateriais.

De acordo com os estudos de Kefeni *et al.* (2017) recentemente uma série de métodos de síntese foram relatados para a preparação de nanopartículas de ferrita, contudo não há um método universal e cada um desses métodos de síntese tem suas próprias vantagens e desvantagens. Ainda de acordo com a pesquisa, entre estes métodos de síntese a microemulsão, radiação sonoquímica e de microondas são novas técnicas e estão sendo cada vez mais utilizadas na era moderna na síntese de uma série de nanopartículas.

Foroughi *et al.* (2015) produziram nanopartículas magnéticas de ferrita de cobalto-hidroxiapatita ($\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-HAp}$) pelo método de microemulsão reversa para serem utilizadas como adsorvente na remoção de zinco de uma solução aquosa. As soluções de microemulsão foram preparadas a partir de uma outra solução contendo 5 gramas de um agente tensoativo, 100 mililitros de n-hexano e 10 mililitros n-butano que foi dividida em 4 partes.

Hu *et al.* (2011) sintetizaram as três grandes fases do óxido de ferro: magnetita (Fe_3O_4), maguemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), sob tratamento com microondas em uma autoclave, a partir de soluções de sais de cloreto de ferro (FeCl_2 e FeCl_3) em álcool/água na presença de hidróxido de sódio (NaOH). A síntese realizada com cloreto de ferro (FeCl_3) como o único precursor levou à produção de fase de hematita pura. Quando o cloreto de ferro (FeCl_2) foi utilizado como o único precursor, as nanopartículas de magnetita ou maguemita foram produzidas dependendo do processo de secagem utilizado.

Jeong *et al.* (2004) utilizaram um método sonoquímico para sintetizar nanotubos de carbono de parede simples via radiação ultrasônica a partir de uma solução contendo pó de sílica, ferroceno e p-xileno. Nesta síntese, o ferroceno foi usado como precursor do ferro catalisador, utilizou-se p-xileno como um precursor de carbono e o pó de sílica

proporcionou locais de nucleação para o crescimento de nanotubos de carbono, como mostrado no esquema da Figura 1.

Figura 1 - Esquema da rota sonoquímica para nanotubos de carbono de parede simples.

Em relação aos nanofluidos híbridos, o trabalho de pesquisa ainda é bastante limitado e muitos estudos experimentais ainda estão por serem feitos (Devendiran e Amirtham, 2016). Contudo, há alguns relatos de métodos utilizados na preparação de nanofluidos híbridos. É o caso dos estudos de Shehata *et al.* (2009) que utilizaram um método mecânico-químico com duas vias diferentes para sintetizar os pós nanocompósitos de cobre-alumina. No primeiro caso adicionou-se cobre à solução aquosa de nitrato de alumínio, já segunda via foi realizada por adição de cobre a uma solução aquosa de nitrato de alumínio e hidróxido de amônio. Em ambos os casos, as misturas foram aquecidas no ar, reduzidas em atmosfera de hidrogênio e fresadas mecanicamente para obter óxidos de pó ultrafinos de óxido de cobre e alumina.

2.4. Estabilização

De acordo com Saidur *et al.* (2011) a estabilidade da dispersão é considerada como uma das questões mais desafiadoras que limitam o uso prático e o desenvolvimento de nanofluidos, especialmente para nanofluidos térmicos, pois de acordo com Yu *et al.* (2017) estes são submetidos a altas temperaturas ou repetidos ciclos de aquecimento/resfriamento, o que aumenta bastante a probabilidade de colisão

e tendência de agregação das nanopartículas.

Segundo Silva (2010), as nanopartículas possuem uma elevada energia superficial e, como consequência, elas tendem a aglomerar-se com facilidade, dificultando a dispersão. A fim de contrariar esta tendência natural das nanopartículas e mantê-las afastadas entre si, faz-se necessário que as forças repulsivas sejam suficientemente grandes de modo que o efeito de aproximação entre as partículas seja superado. Essa interação repulsiva é produzida principalmente por dois mecanismos: a repulsão eletrostática e a estabilização estérica.

Na estabilização estérica são adicionados polímeros à suspensão que ao se adsorverem à superfície da partícula evitam que estas se aproximem. Essa adsorção cria uma barreira com espessura suficiente para manter as partículas separadas através de bloqueios estéricos entre as camadas poliméricas, como esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Representação da estabilização estérica.

Segundo Silva (2010), na estabilização eletrostática a presença de carga em partículas suspensas resulta num aumento de contra-íons à superfície, levando com que em torno de cada partícula se forme uma dupla camada elétrica. O íon, de carga positiva ou negativa, e o contra-íon, formam a parte fixa da dupla camada elétrica, onde os íons se encontram fortemente ligados à superfície. Mais distante da superfície encontra-se a parte difusa da dupla camada que consiste em íons de polaridades diferentes, os quais se

estendem sobre a fase líquida. Quando a partícula se move, existe uma fronteira imaginária dentro da camada difusa onde os íons acompanham o movimento da partícula formando um sistema estável.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A incorporação de nanopartículas no fluido base conduz a alterações nas propriedades termofísicas, como a condutividade térmica, a viscosidade e o calor específico que afetam a transferência de calor convectiva. As principais propriedades dos nanofluidos são discutidas a seguir.

3.1. Condutividade Térmica

Diversos estudos mostram que a condutividade térmica dos nanofluidos é maior do que os fluidos de base. Wei *et al.* (2009) obtiveram um aumento de 24% na condutividade térmica ao adicionar nanopartículas de óxido cuproso em água como fluido base.

Yu *et al.* (2010) relataram um acréscimo na condutividade térmica de um nanofluido a base de querosene a partir da adição de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4).

Outro estudo foi realizado por Yu *et al.* (2011) mostra uma significativa melhoria da condutividade térmica em nanofluidos contendo nano-folhas de grafeno dispersas em etilenoglicol. Os nanofluidos de grafeno foram preparados pelo seguinte método, após a síntese das nanopartículas de grafeno a partir do óxido de grafite, foi fixada uma qualidade do grafeno com diferentes frações de volume (ϕ : 0,01-0,05, ϕ é a fração volumétrica de nanopartículas de grafeno) a qual foi dispersa em etilenoglicol. A mistura de nanofluido foi agitada e sonicada usando máquina de lavar ultrassônica. A solução de etanol e óxido de grafeno é marrom, enquanto a solução de grafeno é preta.

Suresh *et al.* (2011) prepararam nanofluidos híbridos alumina-cobre ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$) com água como fluido base, a partir da mistura em pó de alumina (Al_2O_3) e óxido de cobre (CuO) na razão de proporções em peso de 90:10. O resultado experimental da condutividade térmica apresentou maior melhora de 12,11% para uma concentração volumétrica de 2%.

Como visto, muitos estudos sobre

nanofluidos, portanto, concentraram-se na condutividade térmica, que é o parâmetro mais complexo para o processo de transferência de calor (Sui *et al.*, 2017). Maxwell derivou uma equação que tem sido frequentemente utilizada (Eq. 1), onde a condutividade térmica efetiva para uma mistura sólido-líquido é definida (Ozerinç *et al.*, 2010) como:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\Phi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})\Phi} k_{bf} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde k_{eff} , k_p e k_{bf} são as condutividades térmicas do nanofluido, das nanopartículas e do fluido base, respectivamente. A fração volumétrica das partículas na mistura é expressa por Φ . Conforme visto pela expressão, o efeito do tamanho e forma das partículas não foi incluído na análise.

Hamilton e Crosser (1962) estenderam o modelo Maxwell para ter em conta o efeito da forma das partículas sólidas, além das condutividades térmicas de fases sólidas e líquidas e fração volumétrica de partículas. O modelo é o seguinte:

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_{bf} - (n-1)\Psi(k_{bf} - k_p)}{k_p + (n-1)k_{bf} + (k_{bf} - k_p)\Psi} k_f \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde n é o fator de forma empírico e é definido como:

$$n = \frac{3}{\Psi} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde Ψ é a esfericidade. A esfericidade é a proporção da área superficial de uma esfera com um volume igual à da partícula para a área superficial da partícula. Ambos (Eq. 2) e (Eq. 3) são usados frequentemente para relacionar valores experimentais e teóricos

3.2. Viscosidade

A viscosidade é outro fator essencial para aplicações de transferência de calor, pois de acordo com Gupta *et al.* (2017) a queda de pressão e o poder de bombeamento dependem disso. A viscosidade é uma medida da tendência de um líquido para resistir a um fluxo. É a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. O líquido é conhecido como newtoniano quando a viscosidade é constante

mesmo para diferentes valores de taxa de cisalhamento. Quando há variação nos valores da viscosidade para diferentes taxas de cisalhamento, então o líquido é conhecido como não-newtoniano (Suresh *et al.*, 2011).

Em qualquer fluido a viscosidade tem um impacto significativo nas características do fluxo. Em um sistema de nanofluido, a viscosidade afeta a transferência de calor convectiva. Além disso, a adição de nanopartículas em um fluido base resulta em um aumento de viscosidade, introduzindo um efeito negativo no processo de transferência de calor total (Sui *et al.*, 2017).

Chevalier *et al.* (2007) relataram um incremento da viscosidade de cisalhamento com a diminuição no tamanho das nanopartículas. Eles mediram os três diferentes tamanhos de nanopartículas, 35, 94, 190 nanômetros de diâmetro de dióxido de silício em água e dióxido de silício em etileno glicol para diferentes frações volumétricas.

Nguyen *et al.* (2008) estudaram o efeito da temperatura e da concentração volumétrica de nanopartículas na viscosidade dinâmica dos nanofluidos água-alumina com 36 e 47 nanômetros de tamanho de partícula. Os resultados mostraram que, a viscosidade dinâmica dos nanofluidos aumentou extensivamente com fração de volume de partículas de 1% a 9,4%, mas diminuiu com um aumento de temperatura de 22° C para 75° C.

Duangthongsuk e Wongwises (2009) investigaram experimentalmente a viscosidade dinâmica de um nanofluido baseado em nanopartículas de dióxido de titânio dispersas em água com concentração volumétrica de 0,2-2%. Todas as informações foram para temperaturas entre 15° e 35° C. Os resultados mostraram que a viscosidade medida dos nanofluidos aumentou com as concentrações de partículas e diminuiu com o aumento da temperatura dos nanofluidos.

Saeedinia *et al.* (2012) examinaram a viscosidade de nanofluidos feitos a partir de óxido de cobre com óleo de base. Este experimento foi realizado com diferentes frações de peso de 0,2-2% em diferentes temperaturas. Os resultados experimentais mostraram que a viscosidade dinâmica aumenta significativamente com o aumento da concentração de nanopartículas. Maior incremento foi observado nas temperaturas mais baixas dos nanofluidos.

Em outro estudo, Kole e Dey (2013), trabalharam com nanofluidos de cobre-óleo de

motor. Eles prepararam nanofluidos com concentração volumétrica de nanopartículas de cobre entre 0,11-2% com surfactante de ácido oleico. Os resultados experimentais consideraram a influência da fração volumétrica de partículas e temperatura variando de 10° e 80° C. Nesta investigação, o aumento na viscosidade de aproximadamente 71% foi obtido para uma fração volumétrica de nanopartículas de cobre de 2% a 30° C.

Einstein foi o primeiro a calcular a viscosidade efetiva de uma suspensão de sólidos esféricos usando as equações hidrodinâmicas fenomenológicas e propôs o seguinte modelo (Eq. 4) para a viscosidade efetiva (Shima *et al.*, 2010):

$$\frac{\mu}{\mu_{bf}} = 1 + 2,5\phi \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde Φ é a fração do volume de partículas, μ é a viscosidade dinâmica do nanofluido e μ_{bf} é a viscosidade dinâmica do fluido base.

Brinkman (1952) modificou o modelo de Einstein para que ele pudesse ser usado para frações moderadas de volume até 4% (Eq. 5):

$$\frac{\mu}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^{2,5}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Quando $\Phi \geq 0.01$, as interações hidrodinâmicas entre as partículas tornam-se importantes, já que o distúrbio do fluido em torno de uma partícula interage com a de outras partículas. A viscosidade, nesse caso, é dada pela equação proposta no modelo de Batchelor (1977). O modelo (Eq. 6) inclui o efeito devido ao movimento browniano de partículas no estresse em massa de uma suspensão isotrópica de partículas rígidas e esféricas:

$$\frac{\mu}{\mu_{bf}} = 1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

3.3. Calor Específico

O calor específico é uma das principais propriedades para analisar o processo de transferência de calor. Em geral, as nanopartículas exibem menor capacidade de calor específico do que os fluidos e, portanto, necessitarão de uma menor quantidade de calor para que um nanofluido atinja uma determinada

temperatura. Isso produz um efeito positivo, pois proporciona aos nanofluidos a capacidade de armazenar calor com mais facilidade (Sui *et al.*, 2017).

Palm *et al.* (2006) apresentaram o seguinte modelo (Eq. 7) para avaliar a capacidade calorífica específica.

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho c_p)_{bf} + \phi(\rho c_p)_p}{\phi \rho_p + (1-\phi)\rho_{bf}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde $c_{p,nf}$ é a capacidade de calor específico do nanofluido, c_p é o calor específico e ρ é a densidade.

Zhou e Ni (2008) relataram uma investigação experimental sobre o calor específico do nanofluido de alumina à base de água com um calorímetro de varredura diferencial. O resultado indica que o calor específico do nanofluido diminui gradualmente à medida que a concentração do volume Φ de nanopartículas aumenta de 0,0% para 21,7%. A relação entre eles exibe um bom acordo com a predição do modelo de equilíbrio térmico (Eq. 7).

Robertis *et al.* (2012) utilizaram a técnica de calorimetria de varredura de temperatura modulada (MTDSC) aplicada para determinação do calor específico, apresentando boa concordância entre os valores obtidos e tabulados dos componentes constituintes de nanofluidos (etilenoglicol e nanopartículas de cobre). Os resultados mostraram que a presença de nanopartículas de cobre no fluido base altera as características dos processos de cristalização e fusão e reduz os valores de calor específico dos nanofluidos em toda a faixa de temperatura estudada (0° a 140° C).

Saeedinia *et al.* (2012) investigaram experimentalmente as capacidades de calor específico de nanofluidos de óleo de base de CuO com frações de peso de partícula de 0,2 a 2% em diferentes temperaturas. Neste experimento, os nanofluidos apresentaram uma capacidade térmica menos específica que a do fluido base e diminuíram com o aumento da concentração de nanofluidos. O resultado indicou que o calor específico dos nanofluidos com uma fração de 2% em peso era cerca de 23% inferior ao do fluido de base a 40 ° C.

Barbes *et al.* (2014) realizaram experimentos em nanofluidos de nanopartículas de óxido de cobre à base de água e etileno-glicol e compararam-nos com a Equação 7. As

medidas experimentais e as previsões do modelo estão em bom acordo.

3.4. Aplicações dos Nanofluidos

O nanofluido desempenha um papel de suma importância em muitas aplicações que acarretam em um grande impacto no desenvolvimento de equipamentos para inúmeras aplicações de engenharia e medicina. As aplicações dos nanofluidos têm um amplo espectro no campo prático, de modo que exigem artigos de revisão separados a serem cobertos. Algumas das aplicações são discutidas abaixo.

3.4.1. Aplicações Solares Térmicas

Vários documentos de pesquisa (Otanicar *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Mahian *et al.*, 2014; Zamzamian *et al.*, 2014; Rahman *et al.*, 2014; Goudarzi *et al.*, 2015; Jouybari *et al.*, 2017; Noghrehabadi *et al.*, 2017) investigaram o aprimoramento do desempenho térmico alcançado utilizando nanofluidos em diferentes tipos de coletores solares, alguns são discutidos a seguir.

Rahman *et al.* (2014) realizaram um estudo de um coletor solar de forma triangular com um fundo ondulado e três nanofluidos distintos à base de água: cobre, alumina e óxido de titânio. Foi relatado um aumento na transferência de calor convectiva a partir da adição de nanopartículas à água, quando a fração volumétrica das nanopartículas sólidas é mantida em 0,05% ou 0,08%. Além disso, seus resultados elucidaram que o nanofluido cobre-água possui um melhor desempenho do ponto de vista da transferência de calor em comparação com outros nanofluidos investigados; a taxa de transferência de calor aumenta até 24% usando nanofluido cobre-água com uma concentração volumétrica de 10% em vez de água.

Goudarzi *et al.* (2015) investigaram o efeito da variação do pH de dois nanofluidos: óxido de cobre-água e alumina-água sobre a eficiência de um coletor solar cilíndrico. O coletor consiste em um tubo de vidro cilíndrico com tubo helicoidal como receptor da energia solar. As experiências foram realizadas utilizando 0,1% em peso de óxido de cobre e 0,2% em peso de alumina com vários valores de pH e com base no padrão ASHRAE no teste do coletor. Foi adicionado um surfactante aos nanofluidos para melhorar a sua estabilidade após a sonicação.

Os resultados da experiência mostraram que, com a variação do pH dos nanofluidos longe do ponto isoelétrico das nanopartículas (à medida que os nanofluidos se tornam mais ácidos ou básicos), a eficiência térmica do coletor é aumentada. Assim, para o nanofluido de óxido de cobre-água na condição ácida ($\text{pH} = 3$), o aumento da eficiência obtido é de cerca de 52% em comparação com o $\text{pH} = 10,5$ e para o nanofluido alumina-água na condição básica ($\text{pH} = 10,5$), a eficiência do coletor foi em 64,5% maior do que para $\text{pH} = 9,2$. Também a eficiência com o nanofluido alumina-água longe do ponto isoelétrico é maior que a do nanofluido óxido de cobre-água.

Noghrehabadi *et al.* (2017) investigaram experimentalmente a viabilidade da utilização de um nanofluido de óxido de silício-água para melhorar o desempenho térmico de um coletor solar como o esquematizado pela Figura 3. O coletor solar cônico com 1 m^2 de área e em posição normal à terra foi testado em uma cidade no sudoeste do Irã. Os experimentos foram realizados sob o padrão ASHRAE sem qualquer surfactante e com base na radiação solar, taxa de fluxo em massa e variação de temperatura. A eficiência do coletor solar cônico foi aumentada à medida que a taxa de fluxo em massa é aumentada para ambos fluidos de trabalho. No entanto, a altas taxas de fluxo e maior radiação solar, o coletor com nanofluido apresentou maior aumento na eficiência em comparação com o coletor com água. Além disso, a eficiência máxima alcançada foi de cerca de 62% com um aumento na temperatura entre a entrada e a saída igual a $6,8^\circ\text{C}$.

Figura 3 - Representação esquemática de um coletor solar cônico.

3.4.2. Aplicações Mecânicas

A tribologia é o campo da ciência e engenharia que estuda os fenômenos que ocorrem entre superfícies em contato com movimento relativo. Nos processos de fabricação de produtos ou componentes, é comum ocorrer o contato devido o movimento relativo entre a peça a ser produzida e a ferramenta ao qual está executando o processo. Contudo, o contato entre esses dois materiais pode originar defeitos, principalmente superficiais, quando o atrito não for bem controlado. Nesse sentido, alguns esforços vêm sendo empreendidos para se aumentar o entendimento da atuação e redução do atrito nos processos de usinagem e conformação mecânica (Folle e Schaeffer, 2017).

3.4.2.1. Redução de Fricção

Os lubrificantes avançados podem melhorar a produtividade através da economia de energia e da confiabilidade dos sistemas de engenharia. A pesquisa tribológica enfatiza fortemente a redução de fricção e desgaste. As nanopartículas atraíram muito interesse nos últimos anos devido à sua excelente capacidade de carga, boa pressão extrema e propriedades de redução de fricção (Yu e Xie, 2012; Devendiran e Amirtham, 2016).

Zhou *et al.* (2000) avaliaram o comportamento tribológico das nanopartículas de cobre em óleo em uma máquina de quatro esferas. Os resultados mostraram que as nanopartículas de cobre como um aditivo de óleo tinham melhores propriedades de redução de fricção e anti-desgaste do que o ditiofosfato de zinco, especialmente em alta carga aplicada.

Yu *et al.* (2008) estudaram as propriedades de desgaste e fricção de nanopartículas de cobre modificadas na superfície, como aditivo de óleo de 50CC. Quanto maior a temperatura do óleo aplicada, melhor foram as propriedades tribológicas das nanopartículas de cobre. Foi relatado que uma fina película protetora de cobre com menor módulo de elasticidade e dureza foi formada na superfície desgastada, o que resultou nos bons desempenhos tribológicos das nanopartículas de cobre, especialmente quando a temperatura do óleo era maior.

Shen *et al.* (2008) aplicaram nanofluidos de diamante e alumina-água no processo de moagem de lubrificação mínima do ferro fundido.

Os nanofluidos mostraram os benefícios de reduzir as forças de moagem, melhorar a rugosidade da superfície e prevenir a queima de peças. Em comparação com a moagem a seco, a moagem poderia reduzir significativamente a temperatura de moagem.

3.4.2.2. Selagem Mecânica

Os fluidos magnéticos são tipos de nanofluidos especiais. São suspensões coloidais estáveis de pequenas partículas magnéticas, como a magnetita (Fe_3O_4). Kim e Kim (2003) fabricaram pó magnético de ferro-cobalto em tamanho de manométrico para implementar em um mecanismo de vedação de fluido magnético. O pó foi revestido com dióxido de silício para a prevenção da agregação. Também foram aplicados três agentes tensoativos para melhorar a dispersão de partículas no meio fluido. Do teste de desempenho de vedação verificou-se que a pressão de retenção é 25 vezes maior que a de uma vedação de magnetita convencional.

Mitamura *et al.* (2008) estudaram a aplicação de uma vedação de fluido magnético a bombas de sangue rotativo. O selo de fluido magnético desenvolvido funcionou durante mais de 286 dias em uma condição de fluxo contínuo, durante 24 dias em uma condição de fluxo pulsátil e por 24 horas no fluxo sanguíneo. Constatou-se o vedante do fluido magnético como promissor para uma vedação do eixo em bombas de sangue rotativo.

3.4.3 Aplicações automotivas

Diversos pesquisadores se dispuseram a investigar, experimentalmente ou numericamente, o uso de nanofluidos como refrigerante do motor (Ollivier *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2008; Peyghambarzadeh *et al.*, 2013; Sridhara *et al.*, 2015).

De acordo com Tawfiki (2017) foram relatados excelentes aprimoramentos nas propriedades térmicas de nanofluidos, tais como nanofluidos baseados em etileno-glicol, em comparação com refrigerantes convencionais, e 50/50 mistura de etileno-glicol e água. Além disso, alguns autores indicaram que a área frontal do radiador pode ser reduzida até 10% devido ao uso de refrigerantes nanofluidicos.

Tzeng *et al.* (2005) dispersaram nanopartículas de óxido de cobre e alumina no óleo da transmissão do motor. Eles relataram

que o desempenho térmico dos nanofluidos tem uma vantagem clara à medida que produziram as temperaturas de transmissão mais baixas, tanto a baixa como a alta velocidade.

Nanofluidos de freio à base de óxidos de cobre (CBN) e de óxido de alumínio foram fabricados utilizando o sistema de síntese de nanopartículas submersas em arco e o sistema de arco de carga de plasma, respectivamente (Kao *et al.*, 2007a,b). Os dois tipos de nanofluidos têm propriedades melhoradas, como um ponto de ebulição mais alto, maior viscosidade e uma maior condutividade que a do fluido de freio tradicional. A classificação de viscosidade do nanofluido com nanopartículas de óxido de cobre tende a ser maior do que o fluido de freio convencional. A maior viscosidade do CBN é atribuída às nanopartículas de óxido de cobre.

3.4.4. Aplicações médicas e biomédicas

Recentemente, os nanofluidos contribuíram em uma ampla gama de aplicações médicas e da indústria biomédica (Tawfiki, 2017). Os nanofluidos estão sendo utilizados em aplicações de nano-medicina, pois muitos estudos indicam que as nanopartículas podem ser utilizadas como veículos de entrega de nanodrogas (Shawgo *et al.*, 2002; Ovsianikov *et al.*, 2007; Kleinstreuer *et al.*, 2008; Tripathi e Beg, 2014), como o sistema esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática de um sistema de entrega de nanodrogas com 4 canais

Além disso, eles podem ser usados para matar células cancerosas sem afetar as células saudáveis próximas, produzindo temperaturas mais altas em torno de tumores (Jordan *et al.*, 1999).

Zhang *et al.* (2007) examinaram o comportamento antibacteriano dos nanofluidos de óxido de zinco (ZnO) contra *E. coli* e os resultados mostraram que os nanofluidos de ZnO têm atividade bacteriostática contra a *E. coli*. A atividade antibacteriana aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas e com a diminuição do tamanho das partículas.

Lyon e Alvarez (2008) propuseram que as suspensões de fulereno (C_{60}) exerceram o estresse oxidativo independente em bactérias, com evidência de oxidação de proteínas, alterações no potencial da membrana celular e interrupção da respiração celular. Jalal *et al.* (2010) prepararam nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) através de um método verde. A atividade antibacteriana de suspensões de nanopartículas de óxido de zinco contra *E. coli* foi avaliada estimando a proporção de bactérias tratadas com óxido de zinco. A taxa de sobrevivência das bactérias diminui com o aumento das concentrações de nanofluidos de óxido de zinco e com o tempo.

3.4.5. Aplicações eletrônicas

Devido à sua redução de tamanho de circuitos integrados e componentes microeletrônicos a dissipação de energia aumentou drasticamente. Os dispositivos eletrônicos avançados enfrentam desafios de gerenciamento térmico a partir do alto nível de geração de calor e a redução da área de superfície disponível para remoção de calor. Nanofluidos têm sido considerados como fluidos de trabalho em tubos de calor para aplicação de resfriamento de dispositivos eletrônicos (Yu e Xie, 2012; Devendiran e Amirtham, 2016; Tawfiki, 2017).

Alguns pesquisadores investigaram o uso de nanofluidos em tubos de calor (Kang *et al.*, 2009; Naphon *et al.*, 2009; Moussa, 2011), eles relataram um aprimoramento da eficiência do tubo de calor com misturas de nanopartículas. Outros pesquisadores como Nguyen *et al.* (2007) projetaram um circuito de líquido fechado para investigar o aumento da transferência de calor de um sistema de resfriamento líquido, substituindo o fluido base água destilada por um nanofluido composto de água destilada e nanopartículas de alumina em várias concentrações. Eles também relataram maior desempenho de refrigeração em seus refrigeradores.

CONCLUSÕES

O presente artigo consistiu em revisar as pesquisas das últimas décadas e o seu respectivo progresso nos aspectos que envolvem os nanofluidos, como métodos de preparação e as formas de estabilização, propriedades termofísicas bem como seus principais campos de aplicações.

Entre os dois métodos comuns relatados para produção de nanofluidos, a técnica de um passo promove uma maior estabilidade no fluido, pois minimiza as aglomerações das nanopartículas em comparação com a técnica de dois passos. Por outro lado, o método de dois passos tem a vantagem de ser mais econômico, pois as técnicas de produção em escala industrial já foram ampliadas, enquanto que o método de passo único, principalmente o método físico, possui um custo mais elevado e limitação da síntese de nanofluidos em larga escala. Até por isso, um método químico de um passo vem sendo desenvolvido para a produção de nanofluidos. Em relação à primeira etapa do método de dois passos, que envolve a síntese de nanopartículas, algumas abordagens têm se destacado, como a produção de nanopartículas por métodos de microemulsão, radiação sonoquímica, micro-ondas e um até um método mecânico-químico na preparação de nanofluidos híbridos. A estabilidade dos nanofluidos é um dos principais desafios que dificultam a sua aplicação prática generalizada, principalmente em nanofluidos térmicos, devido aos ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento a que são submetidos. Estudos mostraram que a estabilidade depende de diferentes fatores, como a adição de surfactantes que produzem forças repulsivas de modo a impedir a aglomeração natural das nanopartículas.

A transferência de calor convectiva é afetada diretamente pelas propriedades dos nanofluidos, principalmente pela condutividade térmica, viscosidade e calor específico. Há diversos modelos de condutividade térmica, viscosidade e calor específico de nanofluidos disponíveis na literatura, e alguns destes modelos aprimorados foram discutidos aqui. Os recentes progressos nas pesquisas, alcançados no aprimoramento da condutividade térmica com uso de nanofluidos, mostraram que essa propriedade é dependente de parâmetros como a fração volumétrica, tamanho e forma das nanopartículas, bem como os tipos de fluido base

e de nanopartículas. Entre estes, a concentração volumétrica de nanopartículas foi o parâmetro chave que teve o efeito mais significativo. A maioria das publicações relatou que ele tem uma relação proporcional direta com o aumento da condutividade térmica. A viscosidade é outra propriedade termofísica importante dos nanofluidos na aplicação da transferência de calor, pois a potência de bombeamento e a queda de pressão dependem dessa propriedade. Os resultados experimentais sobre a viscosidade indicam que ela pode aumentar linearmente ou não linearmente devido à adição de nanopartículas, isto é, devido ao aumento da concentração em volume. Além disso, com o aumento da temperatura, a viscosidade diminui devido ao efeito sobre as forças intermoleculares. A viscosidade também depende do tamanho das partículas, pois aumenta com a diminuição do tamanho das partículas dos nanofluidos. Esta pesquisa também mostrou que o calor específico dos nanofluidos é dependente da concentração volumétrica e do tamanho das partículas, assim como da temperatura. Além disso, os modelos de predição tem se mostrado satisfatórios quando comparados com os valores de calor específico obtidos experimentalmente.

Por fim, a presente revisão também indica que os nanofluidos possuem um leque de oportunidades para aplicações em distintos campos da ciência, entretanto, esses exemplos de aplicações ainda são restritos a testes experimentais, na sua maioria, ou em pequena escala. Na área da captação e utilização da energia solar, alguns testes promissores com nanofluidos têm sido realizados em coletores solares de absorção direta, obtendo-se uma maior eficiência do que com fluidos convencionais. Os nanofluidos também mostraram um aprimoramento nas propriedades tribológicas relacionadas ao desgaste e fricção dos materiais durante processos de conformação mecânica. Ademais, o potencial dos nanofluidos tem sido explorado no desenvolvimento de novos medicamentos e sistemas de transporte no corpo humano para estes, além da possibilidade que oferecem em substituir fluidos convencionais, como a água, no resfriamento de sistemas eletrônicos.

Portanto, os nanofluidos mostram-se uma área promissora para atuais e futuras aplicações e em diversos ramos de pesquisa, contudo, somente quando forem superados os desafios associados ao entendimento teórico, modelos,

custo, preparação, aglomeração, dispersão e estabilidade de nanopartículas em fluidos de base, a comercialização de nanofluidos será viável e bem-sucedida, havendo então desenvolvimentos consideráveis em muitas aplicações.

AGRADECIMENTOS:

Agradecemos a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela ajuda financeira durante período de realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS:

1. AJITHA, B., DIVYA, A., REDDY, P., S., Impact of pH on the Properties of Spherical Silver Nanoparticles Capped by PVA. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, **2013**, 3, 403-406.
2. AKOH, H., TSUKASAKI, Y., YATSUYA, S., TASAKI, A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, **1978**, 45, 495-500.
3. BARBES, B., PÁRAMO, R., BLANCO, E., CASANOVA, C. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. **2014**, 115, 1883-1891.
4. BATCHELOR, G., K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *J. Fluid Mech.* **1977**, 83, 97-117.
5. BRINKMAN, H., C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *Journal of Chemical Physics*. **1952**, 20, 4, 571.
6. CHEVALIER, J., TILLEMENT, O., AYELA, F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied Physics Letters*. **2007**, 91, 1-3.
7. CHOI, S., U., S., EASTMAN, J., A., Enhanced heat transfer using nanofluids. **2001**, U.S. n. 6221275.
8. CHOI, C., YOO, H., S., OH, J., M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle in transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants. *Current Applied Physics*. **2008**, 8, 6, 710-712.
9. DESHMUKH, R., THAKAR, R., MEHRA, A. Ionic liquid assisted synthesis and crystal habit control of cobalt acicular nanoparticles. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*. **2013**, 2, 105-109.
10. DEVENDIRAN, D., K., AMIRTHAM, V., A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2016**, 60, 21-40.
11. DUANGTHONGSUK, W., WONGWISES, S. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **2009**, 33, 706-714.
12. ELSHEIKH, A., H., SHARSHIR, S., W., MOSTAFA, M., E., ESSA, F., A., ALI, M., K., A. Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2018**, 82, 3, 3483-3502.
13. FARIQ, A., KHAN, T., YASMIN, A. Microbial synthesis of nanoparticles and their potential applications in biomedicine. *Journal of Applied Biomedicine*. **2017**, 15, 4, 241-248.
14. FOLLE, L., F., SCHAEFFER, L. Avaliação das condições tribológicas em estampagem de chapas através do ensaio de dobramento sob tensão. *Revista Matéria*. **2017**, v. 22, 2, 1-15.
15. FOROUGHI, F., HASSANZADEH-TABRIZI, S., A., AMIGHIAN, J., SAFFAR-TELURI, A. A designed magnetic CoFe₂O₄-hydroxyapatite core-shell nanocomposite for Zn(II) removal with High efficiency. *Ceramics International*. **2015**, 41, 5, 6844-6850.
16. FUSKELE, V., SARVIYA, R., M. Recent developments in nanoparticles synthesis, preparation and stability of nanofluids.

- Materials Today*. **2017**, 4, n. 2, 4049-4060.
17. GOUDARZI, K., NEJATI, F., SHOJAEIZADEH, E., YOUSEF-ABAD, S., K., A. Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **2015**, 60, 20-27.
 18. GUPTA, M., SINGH, V., KUMAR, R., SAID, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2017**, 74, 638-670.
 19. GU/ZMAN, A., ARROYO, J., VERDE, L., RENGIFO, J. Synthesis and characterization of copper nanoparticles/polyvinylchloride (CNP/PVC) nanocomposites. *Procedia Materials Science*. **2015**, 9, 298-304.
 20. HAMILTON, R., L., CROSSER, O., K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **1962**, 1, 3, 187-191.
 21. HO, P., Y., YIU, S., C., WU, D., Y., HO, C., L., WONG, W., Y. One-step synthesis of platinum nanoparticles by pyrolysis of a polyplatinyne polymer. *Journal of Organometallic Chemistry*. **2017**, 849-850, 4-9.
 22. HU, L., PERCHERON, A., CHAUMONT, D., BRACHAIS, C., H. Microwave-assisted one-step hydrothermal synthesis of pure iron oxide nanoparticles: magnetite, maghemite and hematite. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. **2011**, 60, 2, 198-205.
 23. HUMINIC, A., HUMINIC, G., FLEACA, C., DUMITRACHE, F., MORJAN, I. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles. *Powder Technology*. **2015**, 284, 78-84.
 24. JALAL, R., GOHARSHADI, E., K., ABARESHI, M., MOOSAVI, M., YOUSEFI, A., NANCARROW, P. ZnO nanofluids: Green synthesis, characterization, and antibacterial activity. *Materials Chemistry and Physics*. **2010**, 121, 1-2, 198-201.
 25. JEONG, S., H., KO, J., H., PARK, J., B., PARK, W. A Sonochemical Route to Single-Walled Carbon Nanotubes under Ambient Conditions. *Journal of American Chemical Society*. **2004**, 126, 49, 15982-15983.
 26. JORDAN, A., SCHOLZ, R., WUST, P., FÄHLING, H., FELIX, R. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): Cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **1999**, 201, 413-419.
 27. JOUYBARI, H., J., SAEDODIN, S., ZAMZAMIAN, A., NIMVARI, M., E., WONGWISES, S. Effects of porous material and nanoparticles on the thermal performance of a flat plate solar collector: An experimental study. *Renewable Energy*. **2017**, 114, 1407-1418.
 28. KAO, M., J., LO, C., H., TSUNG, T., T., WU, Y., Y., JWO, C., S., LIN, H., M. Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc-submerged nanoparticle synthesis system. *Journal of Alloys and Compounds*. **2007**, 434-435, 672-674.
 29. KAO, M., J., HO, C., WU, Y., Y., TSUNG, T., T., LIN, H., M. Producing Aluminum-oxide brake nanofluids using plasma charging system. *Journal of Alloys and Compounds*. **2007**, 28, 2, 123-131.
 30. KANG, S., W., WEI, W., C., TSAI, S., H., HUANG, C., C. Experimental investigation of nanofluids on sintered heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*. **2009**, 29, 973-979.
 31. KEFENI, K., K., MSAGATI, T, A., M., MAMBA, B., B. Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterization and applications in electronic device. *Materials Science and Engineering B*. **2017**, 215, 1, 37-55.
 32. KIM, Y., S., KIM, Y., H. Application of ferro-cobalt magnetic fluid for oil sealing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **2003**, 267, 105-110.
 33. KLEINSTREUER, C., LI, J., KOO, J. Microfluidics of nano-drug delivery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **2008**, 51, 23-24, 5590-5597.
 34. KOLE, M., DEY, T., K. Enhanced thermophysical properties of copper

- nanoparticles dispersed in gear oil. *Applied Thermal Engineering*. **2013**, 56, 45-53.
35. LI, Y., ZHOU, J., TUNG, S., SCHNEIDER, E., XI, S. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*. **2009**, 196, 2, 89-101.
 36. LIU, Z., H., HU, R., L., LU, L., ZHAO, F., XIAO, H., S. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector. *Energy Conversion and Management*. **2013**, 73, 135-143.
 37. LU, L., ZHEN-HUA LIU, Z., H., XIAO, H., S. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high-temperature evacuated tubular solar collectors Part 1: Indoor experiment. *Solar Energy*. **2011**, 85, 2, 379-387.
 38. LYON, D., Y., ALVAREZ, P., J. Fullerene water suspension (nC60) exerts antibacterial effects via ROS-independent protein oxidation. *Environmental Science and Technology*. **2008**, 42, 21, 8127-8132.
 39. MAHIAN, O., KIANIFAR, A., SAHIN, A., Z., WONGWISESC, S. Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids. *Energy Conversion and Management*. **2014**, 88, 129-138.
 40. MITAMURA, Y., ARIOKA, S., SAKOTA, D., SEKINE, K., AZEGAMI, M. Application of a magnetic fluid seal to rotary blood pumps. *Journal of Physics: Condensed Matter*. **2008**, 20, 20, 1-5.
 41. MOUSSA, M., G. Effect of nanofluid concentration on the performance of circular heat pipe. *Ain Shams Engineering Journal*. **2011**, 2, 63-69.
 42. NAPHON, P., THONGKUM, D., ASSADAMONGKOL, P. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures. *Energy Conversion and Management*. **2009**, 50, 3, 772-776.
 43. NGUYEN, C., T., ROY, G., GAUTHIER, C., GALANIS, N. Heat transfer enhancement using Al₂O₃ - H₂O nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*. **2007**, 27, 1501-1506.
 44. NGUYEN, C., T., DESGRANGES, F., GALANIS, N., ROY, G., MARÉ, T., BOUCHER, S., MINTSA, H., A. Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International Journal of Thermal Sciences*. **2008**, 47, 103-111.
 45. NOGHREHABADI, A., R., HAJIDAVALOO, E., MORAVEJ, M. An experimental investigation on the performance of a symmetric conical solar collector using SiO₂/water nanofluid. *Transp Phenom Nano Micro Scales*. **2017**, 5, 23-29.
 46. OLLIVIER, E., BELLETTRE, J., TAZEROUT, M. Detection of knock occurrence in a gas SI engine from a heat transfer analysis. *Energy Conversion and Management*. **2006**, 47, 7-8, 879-893.
 47. OTANICAR, T., P., PHELAN, P., E., PRASHER, R., S., ROSENGARTEN, G., TAYLOR, R., A. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. **2010**, 2, 1-13.
 48. OVSIANIKOV, A., CHICHKOV, B., MENTE, P., MONTEIRO-RIVIERE, N., A., DORAISWAMY, A., NARAYAN, R., J. Two Photon Polymerization of Polymer-Ceramic Hybrid Materials for Transdermal Drug Delivery. *Int. J. Appl. Ceram. Technol*. **2007**, 4, 22-29.
 49. OZERINÇ, S., KAKAÇ, S., YAZICIOGLU, A., G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: A state-of-the-art review. *Microfluid and Nanofluid*. **2010**, 8, 2, 145-170.
 50. PAL, S., L., JANA, U., MANNA, P., K., MOHANTA, G., P., MANAVALAN, R. Nanoparticle: An overview of preparation and characterization. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. **2011**, 1, 6, 228-234.
 51. PALM, S., ROY, G., NGUYEN, C., T. Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties. *Applied Thermal Engineering*. **2006**, 26, 17-18, 2209-2218.

52. PEYGHAMBARZADEH, S., M., HASHEMABADI, S., H., NARAKI, M., VERMAHMOUDI, Y. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*. **2013**, 52, 18-16.
53. RAHMAN, M., M., MOJUMDER, S., SAHA, S., MEKHILEF, S., SAIDUR, R. Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water-based nanofluids having a corrugated bottom wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **2014**, 50, 117-127.
54. ROBERTIS, E., COSME, E., H., H., NEVES, R., S., KUZNETSOV, A., Y., CAMPOS, A., P., C., LANDI, S., M., ACHETE, C., A. Application of the modulated temperature differential scanning calorimetry technique for the determination of the specific heat of copper nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. **2012**, 41, 10-17.
55. SAEEDINIA, M., AKHAVAN-BEHABADI, M., A., RAZI, P. Thermal and rheological characteristics of CuO-Base oil nanofluid flow inside a circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **2012**, 39, 152-159.
56. SAIDUR, R., LEONG, K. Y., MOHAMMAD, H. A. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2015**, 15, 1646-1668.
57. SHAWGO, R., S., GRAYSON, A., C., R., LI, Y., CIMA, M., J. BioMEMS for drug delivery. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. **2002**, 6, 4, 329-334.
58. SHIMA, P., PHILIP, J., RAJ, B. Synthesis of aqueous and nonaqueous iron oxide nanofluids and study of temperature dependence on thermal conductivity and viscosity. *Journal of Physical Chemistry*. **2010**, 114, 44, 18825-18833.
59. SHEHATA, F., FATHY, A., ABDELHAMEED, M., MOUSTAFA, S., F. Preparation and properties of Al₂O₃ nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing. *Materials and Design*. **2009**, 30, 7, 2756-2762.
60. SHEN, B., SHIH, A., J, TUNG, S., C. Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding. *Tribology Transactions*. **2008**, 51, 6, 730-737.
61. SILVA, A. C. M. Transferência de calor em nanofluidos - Potencialidades e desafios. **2010**, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
62. SRIDHARA, V., GOWRISHANKAR, B., S., SNEHALATHA, SATAPATHY, L., N. NanoFluids—A New Promising Fluid for Cooling. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. **2015**, 68, 1-17.
63. SUI, D., LANGÅKER, V., H., YU, Z. Investigation of thermophysical properties of Nanofluids for application in geothermal energy. *Energy Procedia*. **2017**, 105, 5055-5060.
64. SURESH, S., VENKITARAJ K., P., SELVAKUMAR, P., CHANDRASEKAR, M. Synthesis of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **2011**, 388, 1-3, pp. 41-48.
65. TAWFIKI, M., M. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2017**, 75, pp. 1239-1253.
66. TRIPATHI, D., BÉG, O., A. A study on peristaltic flow of nanofluids: Application in drug delivery systems *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **2014**, 70, 61-70.
67. TZENG, S., C., LIN, C., W., HUANG, K., D. Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles. *Acta Mechanica*. **2005**, 179, 1-2, 11-23.
68. WEI, X., ZHU, H., KONG, T., WANG, L. Synthesis and thermal conductivity of Cu₂O nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **2009**, 52, 19-20, pp. 4371-4374.
69. XUAN, Y., LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International*

- Journal of Heat and Fluid Flow*. **2000**, 21, 58-64.
70. YU, F., CHEN, Y., LIANG, X., XU, J., LEE, C., LIANG, Q., TAO, P., DENG, T. Dispersion stability of thermal nanofluids. *Progress in Natural Science: Materials International*. **2017**, 27, 531-542.
 71. YU, W., XIE, H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. *Journal of Nanomaterials*. **2012**, Article ID 435873: 1-17.
 72. YU, W., XIE, H., CHEN, L., LI, Y. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe_3O_4 nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. **2010**, 355, 1-3, 109-113.
 73. YU, W., XIE, H., WANG, X., WANG, X. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. *Physics Letters A*. **2011**, 375, 7, 1323-1328.
 74. YU, H., L., XU, Y., SHI, P., J., XU, B., S., WANG, X., L., LIU, Q. Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. **2008**, 18, 3, 636-641.
 75. ZAMZAMIAN, A., H., KEYANPOURRAD, M., KIANINEYESTANI, M., JAMAL-ABAD, M., T. An experimental study on the effect of Cu-synthesized/EG nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Renewable Energy*. **2014**, 71, 658-664.
 76. ZHANG, L., JIANG, Y., DING, Y., POVEY, M., YORK, D. Investigation into the antibacterial behavior of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). *Journal of Nanoparticle Research*. **2007**, 9, 3, 479-489.
 77. ZHOU, S., Q., NI, R. Measurement of the specific heat capacity of water-based Al_2O_3 nanofluid. *Applied Physics Letters*. **2008**, 92, 9, 093123: 1-3.
 78. ZHOU, J., WU, Z., ZHANG, Z., LIU, W., XUE, Q. Tribological behavior and lubricating mechanism of Cu nanoparticles in oil. *Tribology Letters*. **2000**, 8, 4, 213-218.
 79. ZHU, H., T., LIN, Y., S., YIN, Y., S. A

novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*. **2004**, 277, 100-103.