

2

Uma breve revisão sobre nanofluidos

Os nanofluidos são obtidos a partir da suspensão de partículas de tamanho nanométrico (entre 1 e 100 nm) em fluidos convencionais de transferência de calor, usualmente líquidos (Yu et al., 2007).

Estes líquidos têm mostrado capacidade de troca de calor significativamente superior a fluidos convencionais tais como: água, etileno-glicol, óleo, entre outros. Tal é devido, principalmente, e entre outras possíveis razões, à maior ordem de grandeza da condutividade térmica dos sólidos utilizados nas suspensões.

Na Figura 1 mostra-se uma comparação da condutividade térmica de algumas substâncias respeito à condutividade térmica da água, tendo esta última um valor referencial de um. As partículas metálicas possuem condutividades de até duas ordens de grandeza maior quando comparadas com a água, ao contrário dos fluidos de troca de calor como EG e óleo, que apresentam condutividades térmicas menores.

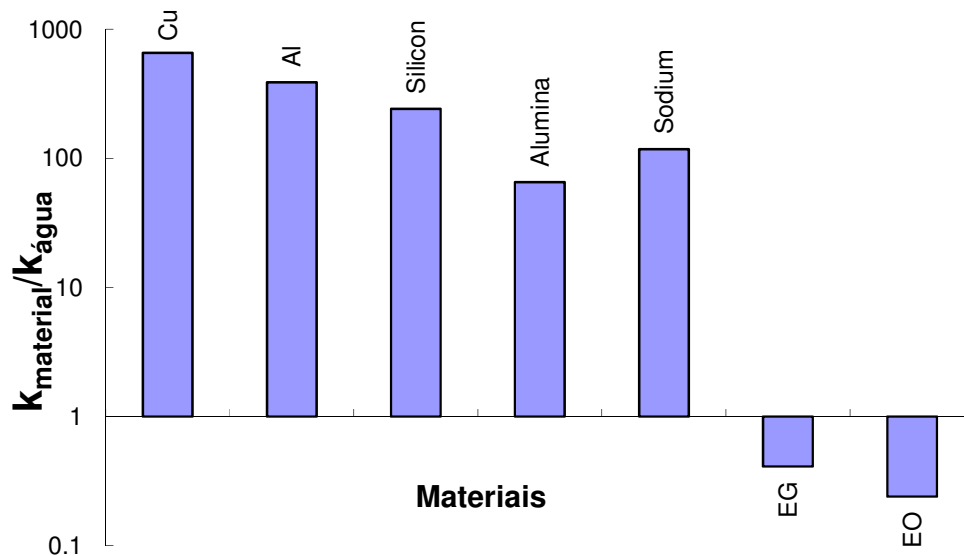


Figura 1 – Condutividade térmica de algumas substâncias com respeito à condutividade térmica da água, baseado em Wang e Mujumdar (2008).

Já é conhecido, há algum tempo, o fato de que a suspensão de partículas sólidas em líquidos provoca um incremento da condutividade térmica da solução em relação à do fluido - base (Witharana, 2003).

Apesar dos benefícios desta aplicação, do ponto de vista dos processos de transferência de calor, partículas de tamanho da ordem de milímetros ou micrométricas também geram problemas, principalmente no que diz respeito a obstruções em várias partes do sistema (Witharana, 2003).

Neste sentido, os nanofluidos estão sendo considerados como a próxima geração de fluidos de transferência de calor, pois oferecem novas possibilidades de aumento do desempenho de troca de calor se comparados a líquidos puros.

Bandarra Filho et al. (2008) resumiram alguns dos aspectos de maior interesse na pesquisa sobre nanofluidos:

1. Elevada condutividade térmica quando comparados aos fluidos convencionais;
2. Aumento ou diminuição da troca de calor com o aumento da concentração volumétrica em condições de fase única;
3. Inexistência de uma tendência clara (aumento ou diminuição) no caso da transferência de calor por ebulição.

2.1. Produção de nanopartículas e nanofluidos

A produção de nanopartículas, descrita resumidamente por (Loaiza, 2009), pode ser classificada em duas categorias principais, a saber: processos físicos e processos químicos (Yu et al., 2007).

Tipicamente, os métodos físicos incluem métodos de trituração mecânica e técnicas de condensação em gás inerte (Granqvist e Buhrman, 1976).

Métodos químicos para a produção de nanopartículas incluem precipitação química, deposição química de vapor, microemulsões e combinação de plasma em métodos de fase gasosa, este último ilustrado na Figura 2 (Hosokawa et al., 2007).

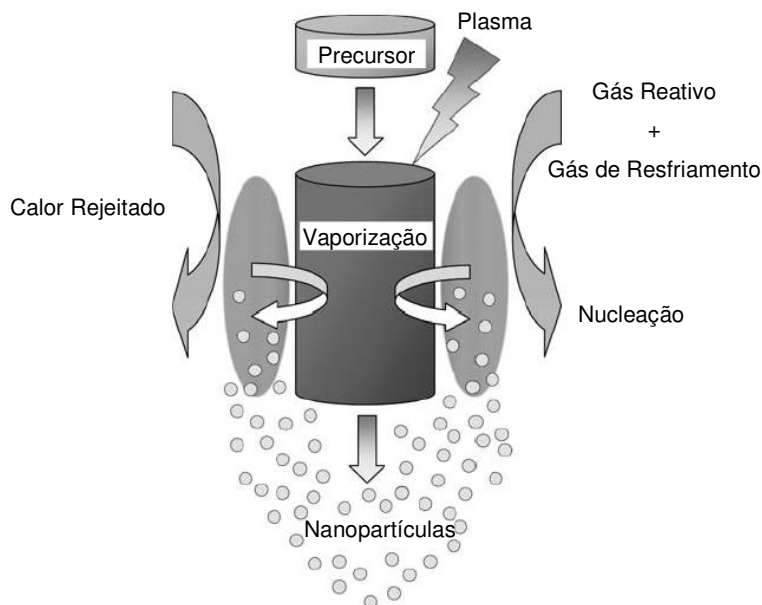


Figura 2 – Sistema de produção de nanopartículas pelo método de fase gasosa incrementado por plasma (Hosokawa et al., 2007).

Os nanofluidos podem ser classificados segundo o tipo de partícula suspensa neles. Segundo Das et al., (2008) os tipos de nanopartículas usadas para compor os nanofluidos podem ser:

1. Óxidos cerâmicos (Al_2O_3 , CuO).
2. Nitridos cerâmicos (AlN , SiN).
3. Cerâmicos á base de carbeto (SiC , TiC).
4. Metais (Cu , Ag , Au).
5. Semicondutores (TiO_2 , SiC).
6. Nanotubos de carbono.

Assim, um nanofluido que contenha partículas de trióxido de alumínio, Al_2O_3 (alumina), suspensas em uma base líquida como a água, denomina-se nanofluido Al_2O_3 – água. A Figura 3 mostra uma micrografia de nanopartículas de alumina.

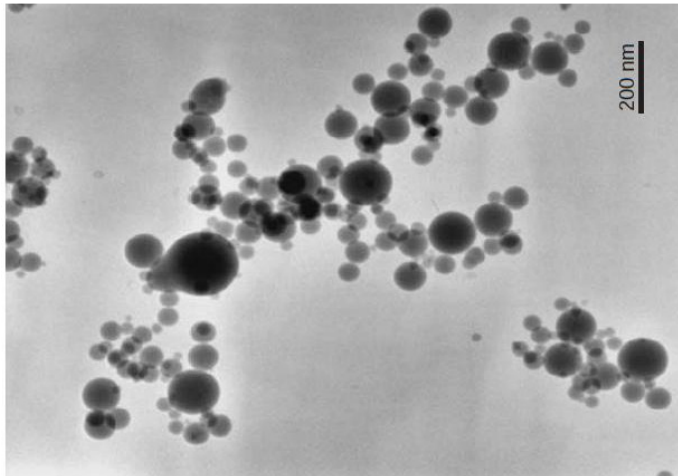


Figura 3 – Nanopartículas de 79% Al_2O_3 – 21% SiO_2 (Hosokawa et al., 2007).

Novas tecnologias têm permitido a fabricação de materiais em escalas nanométricas. As nanopartículas são uma classe de materiais que exibem propriedades físicas e químicas únicas, quando comparadas aos mesmos materiais em escalas maiores (Yu et al., 2007).

Os nanofluidos são produzidos mediante duas técnicas distintas:

1. A técnica do passo único na qual, simultaneamente, produz-se e se dispersa as nanopartículas diretamente dentro do fluido - base, como indicado na Figura 4.
2. A técnica de dois passos começa com a nanopartícula produzida por uma das técnicas de síntese (física ou química) já descritas, procedendo-se, posteriormente, à sua introdução em um fluido - base, como mostrada na Figura 5.

Muitos dos nanofluidos que contêm óxidos metálicos e nanotubos de carbono, descritos na literatura, são produzidos pelo processo de dois passos (Wang e Mujumdar, 2008).

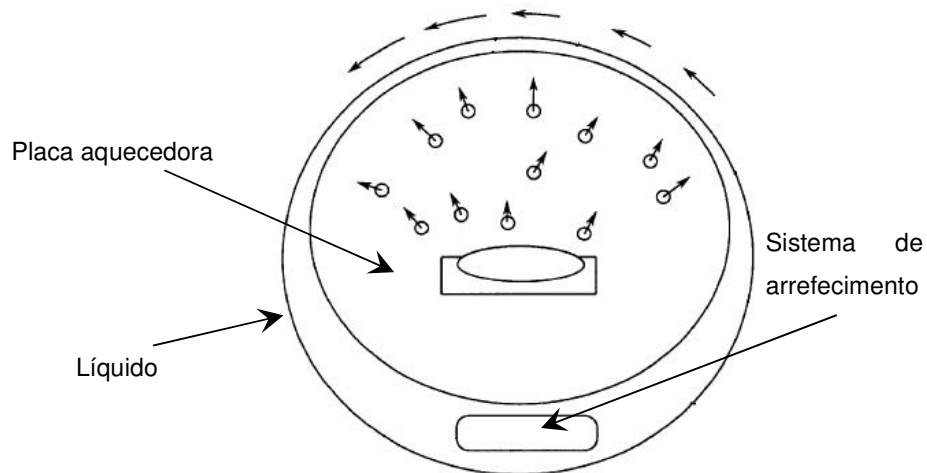


Figura 4 - Esquema da produção de nanofluidos por evaporação – condensação de vapor metálico (Choi e Eastman, 2001).

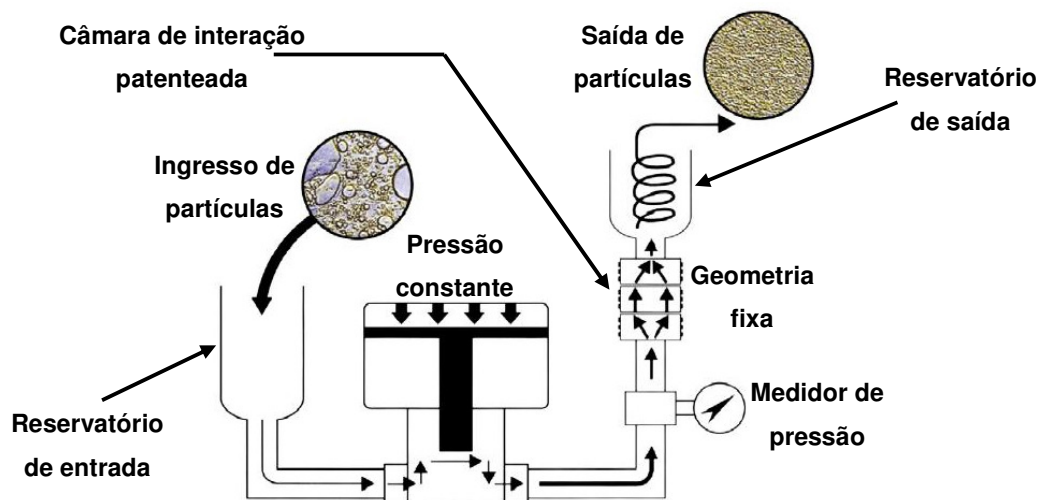


Figura 5 – Esquema do homogenizador de alta pressão para a produção de nanofluidos em dois passos (Hwang et al., 2008).

2.2.

Propriedades dos nanofluidos

2.2.1.

Condutividade térmica efetiva

A condutividade térmica é um dos parâmetros mais determinantes na intensificação da transferência de calor de fluidos térmicos (Trisaksri e Wongwises, 2007). Além disso, ainda não foi possível estabelecer um modelo que descreva totalmente o comportamento desse parâmetro nos nanofluidos (Wang e Mujumdar, 2008), pois nem em todos os casos esses modelos prevêm os resultados dos testes experimentais.

Existem vários modelos teóricos que permitem prever a condutividade térmica dos nanofluidos, desde os mais simples como os que levam em consideração as condutividades dos componentes da mistura; até os mais elaborados como os que levam em conta as influências da interface partícula – fluido e as interações entre elas.

Devido à dificuldade de se estimar as propriedades dos nanofluidos, sem um conhecimento completo da sua microestrutura, uma abordagem empregada para se contornar este problema é proceder à estimativa das propriedades efetivas baseadas em hipóteses da microestrutura das misturas (Das et al., 2008).

Das et al. (2008), resumiram alguns dos modelos desenvolvidos para estimar a condutividade térmica e tentar explicar o seu comportamento. Basicamente, os modelos existentes podem levar em consideração se a partícula está se movimentando ou não no interior do fluido-base. Assim, os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. Alguns desses modelos são numerados a seguir:

1. Regra simples das misturas.
2. Equação de Maxwell.
3. Distribuição de partículas.
4. Geometria das partículas.
5. Efeitos interfaciais fluidos base – partícula.
6. Modelos dinâmicos.

Dos modelos acima descritos, somente alguns serão mencionados no presente estudo, pois até a data do presente estudo só os modelos dinâmicos tem apresentado uma descrição mais realista da condutividade térmica nos nanofluidos.

No método da regra simples das misturas, se descreve a condutividade térmica efetiva como sendo influenciada pelos seguintes parâmetros:

$$k_{nf} = f(k_{fb}, k_{np}, \phi_{np}) \quad (2.1)$$

A relação funcional deste modelo não leva em consideração: a dimensão da partícula, a sua geometria, a sua distribuição no meio solvente e a movimentação das partículas no fluido. Além disso, ele prevê os casos em que: $\phi = 0$ e $\phi = 1$; e estabelece limites para os valores da condutividade, segundo o valor do expoente ($n = 0$ ou $n = 1$). A equação empírica geralmente empregada é:

$$k_{nf}^n = (1 - \phi_{np}) k_{fb}^n + \phi_{np} k_{np}^n \quad (2.2)$$

$$-1 \leq n \leq 1 \quad (2.3)$$

Este modelo não permite prever os valores da condutividade sem um conhecimento da microestrutura, como por exemplo, a distribuição espacial das partículas.

Maxwell (1954) foi um dos primeiros a estudar a condutividade térmica de partículas esféricas suspensas em uma solução aquosa, mas sem levar em consideração a interação entre partículas. Duas considerações são feitas no desenvolvimento do modelo de Maxwell, para uma partícula de raio r_0 contendo todas as partículas esféricas suspensas no meio fluido.

Em primeiro lugar, pode-se considerar um sistema heterogêneo (fluido + partícula de raio r_0) com uma condutividade térmica efetiva k_{nf} . Segundo pode-se considerar que a temperatura da mistura é produzida pela condutividade de cada nanopartícula, k_{np} . Em ambas as abordagens, a solução da equação de Laplace para o campo de temperaturas resulta na seguinte equação:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.4)$$

Modificações na eq. (2.4) têm sido desenvolvidas para uma melhor estimativa da condutividade de fluidos com suspensões de partículas solidas. Hamilton e Crosser (1962) estudaram a condutividade térmica da mistura considerando um fator de forma empírico em função da esfericidade, definido como a razão entre a superfície de uma esfera de volume, igual à da partícula e a superfície da partícula. A expressão da condutividade resulta em:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\Psi^{-1}\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\Psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.5)$$

sendo Ψ , a esfericidade da partícula. Para o caso de $\Psi = 1$ (partículas esféricas), a eq. (2.5) toma a forma da eq. (2.4).

Os modelos apresentados anteriormente não consideram o movimento da partícula no meio fluido. Esses modelos baseiam-se na hipótese do fenômeno de difusão como mecanismo de transferência de calor. Considerações do movimento browniano das nanopartículas e do movimento browniano entre as nanopartículas e as partículas do meio fluido pertencem ao campo dos modelos dinâmicos da condutividade térmica.

Jang e Choi (2004) desenvolveram um modelo dinâmico que leva em conta a convecção induzida pelo movimento browniano das nanopartículas. A condutividade térmica efetiva é dada pela seguinte expressão:

$$k_{nf} = k_{fb}(1 - \phi_{np}) + k_{np}\phi_{np} + 3C_1 \frac{d_{fb}}{d_{np}} k_{fb} \text{Re}_{\text{dnano}}^2 \text{Pr} \phi_{np} \quad (2.6)$$

Recentemente, Velagapudi et al. (2008) utilizaram dados experimentais apresentados na literatura e desenvolveram uma expressão para a condutividade térmica dos nanofluidos. A relação proposta é:

$$\frac{k_{nf}}{k_m} = c \text{Re}_m^{0,175} \phi_{np}^{0,05} \left(\frac{k_{np}}{k_m} \right)^{0,2324} \quad (2.7)$$

Através do uso de um método de regressão não-linear foram obtidas as constantes para a equação anterior: $p = 0,175$; $q = 0,05$ e $r = 0,2324$. O valor da constante c , para diferentes nanofluidos, é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 – Valor da constante c da eq. (2.7) para diferentes nanofluidos (Velagapudi, V. et al., 2008).

<i>Nanofluido</i>	<i>c</i>
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1
$\text{CuO} + \text{H}_2\text{O}$	1,298
$\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$	0,74
TiO_2	1,5

Prasher et al. (2005) descreveram três possíveis mecanismos para a transferência de calor em nanofluidos:

1. O movimento de translação browniana.
2. A existência de um potencial entre partículas.
3. Convecção do fluido – base devido ao movimento browniano das partículas.

O modelo da condutividade térmica usado no presente estudo é mostrado na eq. (2.7).

2.2.2. Viscosidade dinâmica

Einstein (1956) foi um dos primeiros a determinar a viscosidade cinemática efetiva de uma suspensão de esferas, apresentando a seguinte correlação (Wang e Mujumdar, 2008):

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi_{np})\mu_m \quad (2.8)$$

Baseados nos resultados da teoria de Einstein (1956), melhores descrições do comportamento da viscosidade têm sido apresentadas por meio de novas correlações.

Em Velagapudi et al. (2008), são apresentadas algumas correlações para a viscosidade dinâmica dos nanofluidos. Para a alumina e o dióxido de titânio, Pak e Cho (1998), mostraram as seguintes correlações:

1. $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$:

$$\mu_{nf} = \mu_m (533,9\phi_{np}^2 + 39,11\phi_{np} + 1) \quad (2.9)$$

2. $\text{TiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$:

$$\mu_{nf} = \mu_m (108\phi_{np}^2 + 5,45\phi_{np} + 1) \quad (2.10)$$

Chen et al. (2007), desenvolveram uma correlação para a viscosidade do nanofluido $\text{Cu} - \text{H}_2\text{O}$, da seguinte maneira:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (0,995 + 3,645\phi_{np} + 468,72\phi_{np}^2) \quad (2.11)$$

Kulkarni et al. (2006), apresentam uma correlação para a viscosidade cinemática efetiva do nanofluido $\text{CuO} - \text{H}_2\text{O}$ para diferentes concentrações volumétricas de partículas:

$$\ln(\mu_{nf}) = A \left(\frac{1}{T} \right) B \quad (2.12)$$

As constantes A e B são polinômios que dependem da concentração volumétrica, conforme a seguir:

$$A = 20587\phi_{np}^2 + 15857\phi_{np} + 1078,3 \quad (2.13)$$

$$B = -107,12\phi_{np}^2 + 53548\phi_{np} + 2,8715 \quad (2.14)$$

Yu et al. (2007) alertam sobre a impossibilidade de se reduzir estas equações à equação de Einstein para concentrações de partículas muito baixas, o que demonstra um embasamento físico limitado.

A viscosidade dinâmica tem apresentado um comportamento similar à condutividade térmica efetiva. Nos testes experimentais os resultados mostraram um aumento da viscosidade com a concentração.

Por exemplo; Pak e Cho (1998), encontraram valores de aproximadamente 200 em 10 % em volume de partículas, para a viscosidade relativa do nanofluido $H_2O - TiO_2$ (Duangthongsuk e Wongwises, 2009). As correlações apresentadas nas eq. (2.9) até (2.14) são usadas no presente estudo.

2.2.3.

Densidade e calor específico

A densidade efetiva, ρ_{nf} , e o calor específico efetivo, $c_{p,nf}$, podem ser definidos segundo o princípio físico da regra das misturas da seguinte maneira (Yu et al., 2007):

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_{np}) \rho_{fb} + \phi_{np} \rho_{np} \quad (2.15)$$

e,

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi_{np}) (\rho c_p)_{fb} + \phi_{np} (\rho c_p)_{np}}{(1 - \phi_{np}) \rho_{fb} + \phi_{np} \rho_{np}} \quad (2.16)$$

respectivamente.

O modelo do calor específico, $c_{p,nf}$, assume que o fluido base e as nanopartículas estão em equilíbrio térmico, e é derivado a partir de um balanço térmico entre o fluido e a partícula.