



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR

São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

MARCELO SILVA MONTEIRO

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar a ebulição convectiva de nanofluidos e sua aplicação em sistemas de refrigeração. Com este propósito modelos de previsão das propriedades térmicas, perda de pressão, CTC - Coeficiente de Transferência de Calor por convecção de nanofluidos foram pesquisados.

Com os modelos as propriedades térmicas (condutividade térmica, viscosidade dinâmica, calor e massa específica), a perda de pressão e o CTC de nanofluidos foram previstos para um escoamento através de um tubo horizontal liso em diferentes condições. Uma combinação de nanopartículas com refrigerantes halogenados foi utilizada para composição dos nanofluidos.

Foi verificado que a adição de nanopartículas ao fluido base geralmente provoca incrementos na condutividade térmica. Este incremento na condutividade térmica aumenta o CTC melhorando assim o desempenho de sistemas de refrigeração. A tendência de aumento no CTC também é verificada através de resultados experimentais disponíveis na literatura.

As nanopartículas de óxidos metálicos, por possuírem menor massa específica, causam menor incremento na perda de pressão em relação as metálicas sendo por este motivo mais indicadas para aplicação em sistema de refrigeração.

Palavras-chave: Refrigeração, Nanofluido, Nanopartícula, ebulição

ABSTRACT

The present study has objective to analyze theoretically the nanofluids flow boiling and its influence in refrigeration systems by steam compression. With this purpose predication models of thermal properties, pressure loss, HTC - Heat Transfer Coefficient Convective of nanofluids were searched and later discussed.

Using the mathematics models the thermal properties (thermal conductivity, viscosity, heat and mass specific), lost pressure and HTC were prediction to nanofluid flow through smooth flat horizontal pipe in different conditions. A mixed combination of nanoparticle with halogenated refrigerants was used to composition of the nanofluids.

Was found that the addition of nanoparticles in the base fluid generally causes increases in thermal conductivity. This increase in thermal conductivity increases the HTC improving the performance of refrigeration systems. The tendency of increase in CTC is also verified through experimental results available in the literature.

The metallic oxide nanoparticles are more indicated for application in the refrigeration system than metallic because they have lower specific mass causing smaller increase in lost pressure.

Keywords: Refrigeration, Nanofluid, Nanoparticle, Boiling.

1 INTRODUÇÃO

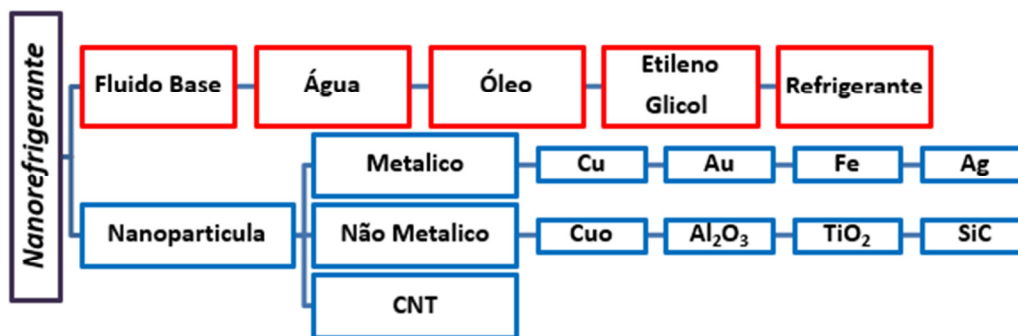
O tema do presente artigo é avaliar teoricamente a influência da ebulição convectiva de nanofluidos em sistemas de refrigeração por compressão de vapor. A relevância do tema é baseada no fato de sistemas de refrigeração por compressão de vapor serem responsáveis por 15% de toda a energia elétrica consumida mundialmente, o que corresponde a 4,5% do total de gases emitidos relacionados ao efeito estufa (Borlein, 2011). Segundo o BEN - Balanço Energético Nacional 2016, relativo ao ano de 2015, as edificações são responsáveis por 50% do consumo elétrico, sendo os sistemas de climatização os que mais pesam. Por estes motivos, estudos visando a melhoria na eficiência energética de equipamentos de ar condicionado e refrigeração, operando conforme o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, é um tema de grande interesse entre os estudiosos na área de refrigeração que vem sendo amplamente estudado. A introdução representa o contato inicial do leitor com o texto, portanto, deve ser clara, objetiva e sintética. Nela trata-se sucintamente da natureza do assunto, dos objetivos, das limitações, dos métodos e resultados do trabalho apresentado.

Nesse sentido, uma das alternativas para aumentar o desempenho e reduzir o consumo de energia em sistemas de refrigeração pode ser a utilização de fluidos refrigerantes com nanopartículas denominadas nanofluidos.

Nanofluidos, também denominados por nanorefrigerantes são dispersões de partículas sólidas em escala nanométrica (1 a 100 nm) em fluidos comuns denominados fluidos base. A dispersão é preparada através de processos físicos ou químicos especiais. Nanofluidos são produzidos através do método de passo (As partículas são produzidas e simultaneamente dispersas no fluido base através de um processo químico) ou dois passos (As partículas são produzidas e posteriormente despesas no fluido base através de um processo físico).

Os principais tipos de partículas são: metais estáveis (ouro, prata, cobre, etc.), óxidos metálicos (alumina, óxido de cobre, óxido de titânio, etc.), carbono em diversas formas (grafite, diamante, nano tubos de carbono, etc.) e óxidos cerâmicos (óxido de silício). Por sua vez, os principais fluidos base utilizados são: água, etileno glicol e fluidos refrigerantes conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Fluidos e partículas normalmente utilizadas na fabricação de nanofluidos



Fonte: Elaborado pelo autor

Nanofluidos possuem melhores propriedades térmicas em relação ao fluido base, principalmente a condutividade térmica. Como ilustrado na tabela 1 a condutividade térmica dos sólidos é muito superior à dos líquidos e por esta razão a condutividade térmica do nanofluido é superior à do fluido base.

Tabela 1 – Propriedades Térmicas das nanopartículas, R134a (fase líquida) e Água

	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	k (W/m K)	Cp (j / kg K)	Referência
Al ₂ O ₃ (Dp=30nm)	-	3880	40	729	Mahbubul (2013)
Cuo (Dp=30nm)	-	6320	32,9	550,5	Peng (2009)
R134a (T= 0°C)	0,0002655	1295	0,09462	1341	Cengel (2006)
Água (T=25°C)	0,0008905	997	0,5947	4183	Cengel (2006)

2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM NANOFLUIDOS

A maioria das pesquisas evidencia que o uso de nanofluidos intensifica a transferência de calor possibilitando a construção de trocadores de calor com menores dimensões e melhor desempenho de sistemas de refrigeração. A razão é que o CTC - Coeficiente de Transferência de Calor por convecção aumenta devido ao incremento na condutividade térmica com a adição de nanopartículas ao fluido base, conforme já explicado.

Na tabela 2 são apresentados alguns resultados de pesquisas experimentais sobre a ebulição convectiva de nanofluidos e o COP – Coeficiente de Desempenho de sistemas de refrigeração operando com este fluido.

Tabela 2 – Resultados de pesquisas sobre CTC e o COP com nanofluidos

Autor	Nanofluido	Resultados
Peng. (2009)	R-113/CuO	Verificou-se melhoria de 29,7% no CTC em relação ao fluido puro. O autor também observou a ocorrência da sedimentação de nanopartículas.
Henderson (2010)	R-134a/CuO	Observado aumento no CTC de 52% para concentração de 0,04 % e de 76% para 0,08%.
Rahul (2014)	R-134a/ Al ₂ O ₃	CTC aumentou 1,7% para fração de 0,08% e diminuiu 4,5, 8,5 e 15% para frações de 0,22, 0,5 e 1,34 % respectivamente.
K. Singh (2015)	R-134a/ Al ₂ O ₃	Para 21°C o COP aumentou 8,5% para 0,5% (p/p) e reduziu 5,4% para 1% (p/p). Para 28°C o COP aumentou 9,3% para 0,5% (p/p) e reduziu 20,5% para 1%.

3 MODELOS PARA PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, CTC E PERDA DE PRESSÃO DE NANOFLUIDOS

As principais propriedades térmicas que afetam a transferência de calor são a condutividade térmica e a viscosidade que por este motivo são detalhadas neste tópico.

A condutividade térmica mede a capacidade de um fluido conduzir calor, assim sendo, um dos parâmetros mais determinantes na intensificação da transferência de calor de fluidos térmicos. 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 temperatura, nanocamada e do movimento Browniano das nanopartículas no líquido como o de Corcione (2011).

A viscosidade é relacionada com a taxa de deformação de um fluido sendo caracterizada pela resistência ao movimento de um material (escoamento). Assim a análise da viscosidade é fundamental na análise do processo de transferência de calor e da potência necessária ao bombeamento de um fluido. A relevância da viscosidade em suspensões tem estimulado a criação de modelos teóricos que a descrevam, como por exemplo o de Brinkman (1952) que por ser um dos mais referenciados na literatura.

Os modelos utilizados para previsão das propriedades térmicas dos nanofluidos neste trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos utilizados na previsão das propriedades térmicas dos nanofluidos

Propriedade	Modelo	Modelo	Eq.º
Massa Específica	Park (1998)	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}$	(1)
Calor Específico	Park (1998)	$C_{\rho,nf} = \frac{\phi(\rho C_p)_{np} + (1 - \phi)(\rho C_p)_{fb}}{\phi\rho_{np} + (1 - \phi)\rho_{fb}}$	(2)
Viscosidade Dinâmica	Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi_v)^{2,5}} \mu_{fb}$	(3)
Condutividade Térmica	Corcione (2011)	$\frac{K_{nf}}{K_{fb}} = \left[1 + 4,4Re^{0,4}Pr^{0,66} \left(\frac{T}{T_{pc}} \right)^2 \left(\frac{K_{np}}{K_{fb}} \right)^{0,03} \phi^{0,66} \right]$	(4)

Fonte: Heat Transfer With Nanofluids

Nas equações ρ é a massa específica, ϕ a concentração volumétrica, C_p o calor específico, μ a viscosidade dinâmica, K é a condutividade térmica, Re o número de Reynolds e T a temperatura do nanofluido. Os índices nf,fb e pc indicam nanofluido, fluido base e ponto de congelamento.

Os estudos sobre ebulição convectiva de nanofluidos aumentaram gradativamente nos últimos anos devido ao seu melhor potencial de transferência de calor em relação a fluidos puros e a possibilidade de aplicação em diversos sistemas térmicos como o de refrigeração. Apesar do aumento de estudos sobre a ebulição convectiva de nanofluidos não existem na literatura muitos modelos consolidados para previsão do CTC e perda de pressão, e assim, os modelos desenvolvidos para o fluido puro também são utilizados para previsão do CTC e perda de pressão de nanofluidos.

Para a previsão do CTC e perda de pressão o modelo utilizado neste trabalho foi o de Peng et al. (2009) conforme Equação (5) e (6) respectivamente. O modelo é baseado no produto do CTC e perda de

carga do fluido puro por um fator de correção denominado fator de impacto da nanopartícula.

O FIN - Fator de Impacto da Nanopartícula é uma função exponencial que considera a relação entre as propriedades térmicas da nanopartícula e do fluido base, entre os diâmetros da nanopartícula e da seção de escoamento, da velocidade mássica e do título do vapor multiplicados pela fração volumétrica. O fator de impacto das nanopartículas para o CTC e a perda de pressão é dado pelas equações (7) e (8) respectivamente.

$$h_{tf,nf} = h_{tf,fb} FIN_{CTC} \quad (5)$$

$$\Delta P_{nf} = FIN_{PP} \Delta p_{fb} \quad (6)$$

$$FIN_{CTC} = \exp \left\{ \phi \left(0,8 \frac{K_{np}}{K_{fb}} - 3,94 \frac{(\rho C_p)_{np}}{(\rho C_p)_{fb}} - 0,028G - 733,26x(1-x) \right) \right\} \quad (7)$$

$$FIN_{PP} = \exp \left\{ \phi \left(2,19 \times 10^7 \frac{D_{np}}{D_i} + 37,26 \frac{\rho_{np}}{\rho_{fb}} - 0,63G - 217,73x(1-x) \right) \right\} \quad (8)$$

Nas equações (5) a (8) h é o coeficiente de transferência de calor por convecção e D o diâmetro. Os índices i, pp e CTC indicam interno, perda de pressão e coeficiente de transferência de calor por convecção.

4 RESULTADOS DA PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, CTC E PERDA DE PRESSÃO DE NANOFLUIDOS

As propriedades térmicas, o CTC – Coeficiente de transferência de calor e a perda de pressão para nanofluidos foram previstas com a utilização dos modelos citados neste trabalho para o R-134a/CuO e R-134a/ Al₂O₃ nas seguintes condições: Concentração variando de 0,1 a 0,5%, velocidade de 200 kg/m²s e temperatura de 275,15K. Os resultados das análises em função do incremento da concentração das nanopartículas são descritos a seguir.

➤ Analisando a figura 1 (a) observa-se que a massa específica efetiva aumenta. O aumento na massa específica efetiva do nanofluido R134a/Cuo foram superiores ao R134a/ Al₂O₃ em toda faixa analisada. A razão é devida a maior massa específica da nanopartícula de Cuo em relação a Al₂O₃ conforme ilustrado na tabela 1. O maior incremento na massa específica efetiva foi de 19,5% para o R-134a/Cuo com concentração de 0,5%.

➤ De acordo com a figura 1 (b) o calor específico efetivo reduz. A redução no calor específico do nanofluido R-134a/ Al₂O₃ foi maior em toda faixa analisada em relação ao R-134a/ Al₂O₃. A razão é devido ao menor calor específico da nanopartícula de CuO em relação a Al₂O₃ conforme ilustrado na tabela 1. A maior redução no calor específico efetivo foi de 12,13% para o R-134a/Cuo com concentração de 0,5%.

➤ A condutividade térmica e viscosidade efetivas aumentam conforme ilustrado nas Figuras 3 (a) e (b) respectivamente. Como já era esperado o maior incremento na condutividade térmica efetiva foi para o nanofluido R-134a/ Al₂O₃ em toda faixa analisada (maior incremento de 218,2%). A causa é a maior condutividade da nanopartícula de Al₂O₃ em relação ao CuO conforme ilustrado na tabela 1. Já o maior aumento na viscosidade, devido a adição de nanopartículas ao fluido base, foi de 291,2%.

➤ O CTC efetivo dos nanofluidos analisados aumentaram conforme ilustrado na figura 4 (a). Os maiores aumentos formam de 41% para o R-134a/ Al₂O₃. Este aumento é devido a maior condutividade térmica do nanofluido R-134a/ Al₂O₃.

➤ A perda de pressão efetiva dos nanofluidos analisados aumentaram conforme ilustrado na figura 4(b). O maior aumento na perda de pressão foi de 12,6% para o nanofluido R-134a/CuO. Este aumento é devido a maior massa específica da nanopartícula de CuO em relação a Al₂O₃.

Figura 2 – Variação da massa específica (a) e calor específico (b) com a concentração

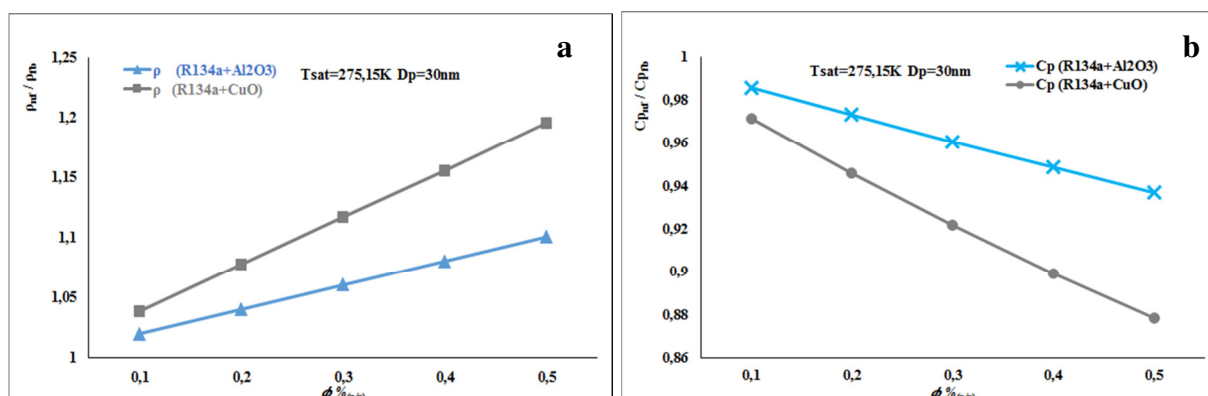


Figura 3 – Variação da Condutividade térmica (a) e Viscosidade (b) efetivas com a concentração

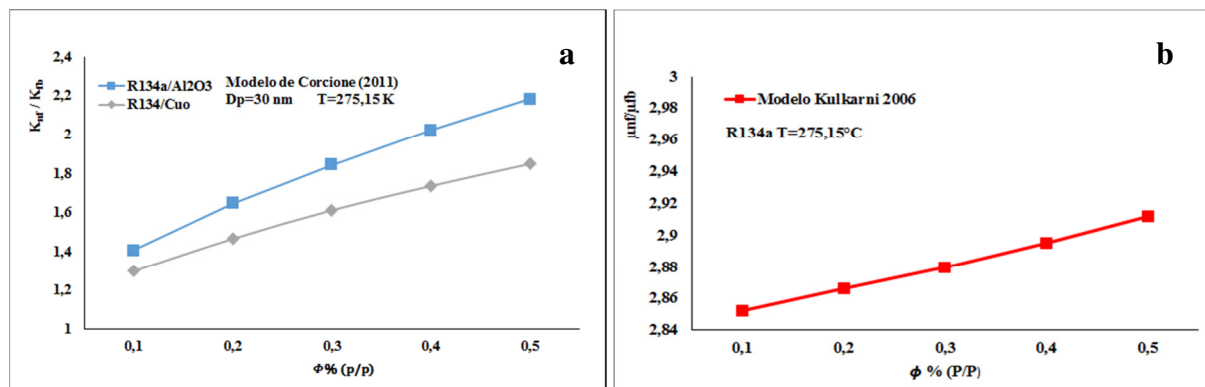
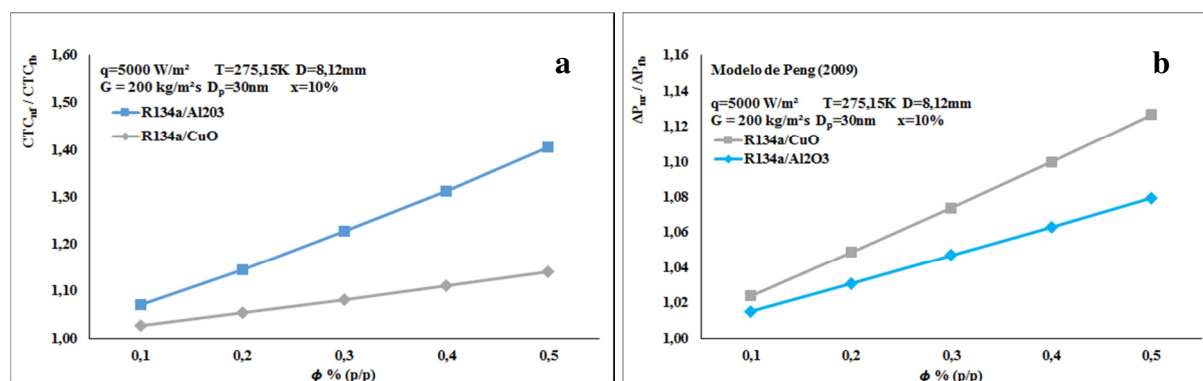


Figura 4 – Variação do CTC (a) e da perda de pressão (b) efetivos com a concentração.



5 CONCLUSÕES

Conclui-se que a adição de nanopartículas ao fluido base pode melhorar o desempenho de sistema de refrigeração, no entanto é necessário avaliar a concentração de nanopartículas de forma a obter o maior incremento no CTC com o menor acréscimo na perda de pressão, o que efetivamente resultaria na melhoria do COP. Assim melhores resultados são esperados para nanofluidos preparados com partículas de maior condutividade térmica e menor massa específica.

Apesar da melhoria no desempenho com nanofluidos, a ocorrência da sedimentação de nanopartículas é um fator que demanda atenção. Este fenômeno causa a redução no CTC devido ao incremento da resistência térmica, aumenta a perda de pressão e pode provocar obstruções em sistemas de refrigeração. Assim é necessário o aprimoramento das tecnologias disponíveis para produção de nanofluidos de forma a garantir a estabilidade da solução (evitar a sedimentação).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a EBSE – Engie Brasil Serviços de Energia por financiar e contribuir para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Borlein, C. (2011). **Energy savings in commercial refrigeration equipment: Low pressure control**. *Schneider Electric SA*.
- Peng H., D. G. (2009a). **Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube**. *Internacional journal refrigeration*, 32, 1259-1270.
- Henderson, K. P. (2010). **Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube**. *Int. Journal Heat. Mass Transf.*, 53, 944-951.
- Rahul, D. (2014). **An experimental study of the flow boiling of refrigerant-based nanofluids**. University of Illinois at Urbana-Champaign,, Urbana, Illinois.

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

M.E. Haque, R. B. (2016). **Performance of a domestic refrigerator using nanoparticles-based polyolester oil lubricant.** *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 10, 1778-1791.

Bianco, V. (2015). **Heat Transfer With Nanofluids.** International Standard Book Number-13: 978-1-4822-5402-0 (eBook - PDF).