

IMPACTO DO USO DE NANOFLUIDOS NA PERDA DE CARGA EM TUBOS CAPILARES

Allison Massao Hirata
allison.hirata@gmail.com

Resumo. Este trabalho apresenta resultados da análise do efeito de nanopartículas em fluidos baseados em refrigerante na perda de carga em tubos capilares. Tal efeito tem sido pouco estudado, apesar do crescente interesse no uso de nanofluidos como alternativa a CFCs. A análise do efeito dessas partículas foi feita por meio de simulação numérica em um programa para escoamento em tubos capilares e utilizando uma adaptação da correlação para o impacto dos nanofluidos na perda de carga. A correlação proposta nesse trabalho pode ser aplicada para uma gama maior de vazões mássicas do que a correlação encontrada na literatura e apresenta aproximadamente a mesma precisão, quando comparado com os resultados experimentais. Diversos parâmetros foram variados e comparados, como temperatura de entrada, título inicial, diâmetro e comprimento do tubo capilar, assim como a fração mássica das nanopartículas. Foram observadas reduções de fluxo de massa de até 0,86% para uma fração mássica de CuO de $w=0,1\%$ e de até 7,35% para $w=0,5\%$. O fluxo de massa decresce aproximadamente linearmente com o aumento do diâmetro do tubo capilar. A influência do título inicial e do comprimento do tubo é aproximadamente constante, entre 0,6% e 0,7% para $w=0,1\%$ CuO. Além disso, observou-se o fenômeno de atraso de vaporização no tubo devido à presença de nanopartículas.

Palavras chave: Nanofluidos, refrigerante, perda de carga, tubos capilares, simulação.

1. Introdução

Os fluidos refrigerantes utilizados atualmente têm sido alvo de discussão devido ao potencial impacto destes na camada de ozônio e para o efeito estufa. A necessidade de substituição destes tem intensificado a pesquisa por combinações de refrigerantes alternativos com o objetivo de aperfeiçoar a eficiência de ciclos de refrigeração industrial e comercial. Um dos mais recentes desenvolvimentos nesse tema é a pesquisa em nanofluidos. Nanofluidos são colóides nos quais é introduzida uma baixa concentração de nanopartículas (moléculas de 1 a 100 nm de diâmetro). Essa nova categoria de fluidos tem sido foco de muitas pesquisas devido à sua potencial capacidade de melhorar a capacidade térmica e a eficiência energética dos fluidos originais. No entanto, o impacto das nanopartículas sobre a perda de carga do sistema tem sido pouco estudado até o momento, embora este seja um fator determinante na escolha do fluido refrigerante.

2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito das nanopartículas na perda de carga no escoamento de um fluido baseado em refrigerante em tubos capilares. Para isso, buscam-se quantificar a influência de diversos parâmetros operacionais sobre o fluxo de massa, fixadas as pressões de entrada e saída do tubo. Essa análise será feita numericamente, por meio de um programa de simulação para tubos capilares associado a um fator de impacto das nanopartículas obtido a partir de resultados experimentais.

3. Panorama do estudo de nanofluidos

Nanofluidos possuem em geral uma condutividade térmica mais importante que os correspondentes fluidos desprovidos dessas nanopartículas. Algumas hipóteses foram feitas para explicar esse resultado, como o aumento da área, uma distribuição mais eficaz da condutividade e o efeito de Sorét.

A viscosidade de nanofluidos aumenta com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas e com a diminuição da temperatura. Tais observações condizem com a teoria macroscópica para fluidos no sentido de que a introdução de partículas resulta em aumento da viscosidade geral. Esta observação é base para o estudo do efeito da perda de carga devido aos nanofluidos.

A maior parte das pesquisas sobre as propriedades dos fluidos com nanopartículas tem utilizado água e etileno-glicol como fluido-base. Esse tipo de fluido, entretanto, não é adequado às aplicações atuais em refrigeração industrial, que é o escopo deste trabalho. Logo, as conclusões decorrentes dos estudos com esses tipos de fluido têm apenas o propósito de servir como referência e suporte às observações sobre o efeito dos nanofluidos em geral, como destacado anteriormente.

4. Análise do experimento de Peng et al.

Peng et. al (2009) realizaram o único trabalho até o momento que apresenta correlações relevantes em relação à perda de carga para nanofluidos baseados em refrigerante. O experimento utilizando R-113 para diferentes fluxos de massa do nanofluido (100, 150 e 200 kg/m²s) e concentrações volumétricas de CuO de 0,1%, 0,2% e 0,5%, obteve os seguintes resultados relevantes:

- A perda de carga no tubo não é desprezível e aumenta com o aumento da concentração em massa das nanopartículas no fluido. A maior perda de carga obtida no experimento foi de 20,8%.
- A perda de carga atinge um mínimo para valores de título entre 0,5 e 0,7.
- A perda de carga aumenta com a redução do fluxo em massa do nanorefrigerante.

Peng et al. propôs um modelo teórico que determina o fator de impacto da nanopartícula sobre a perda de carga. A expressão desse fator, indicada na equação (1), é função do diâmetro do tubo (D_i em m), da massa específica do refrigerante puro no estado líquido ($\rho_{r,L}$ em kg/m³), do fluxo de massa do fluido (G em kg/m²s) da fração volumétrica (φ em m³ de CuO/m³ de mistura), da massa específica (ρ_n em kg/m³) e do diâmetro médio (d_n em m) das nanopartículas, além do título (x adimensional) da mistura.

$$F_{PD} = \exp \left\{ \varphi \times \left[2,19 \times 10^7 \times \frac{d_n}{D_i} + 37,26 \times \frac{\rho_n}{\rho_{r,L}} - 0,63 \times G - 217,73 \times x \times (1-x) \right] \right\} \quad (1)$$

Dado que é medida a fração mássica ω (em kg de CuO/kg da mistura), φ pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\varphi = \frac{\rho_{r,l} \omega}{\rho_{r,l} \omega + \rho_n (1 - \omega)} \quad (\text{em m}^3/\text{kg}) \quad (2)$$

A perda de pressão no tubo é calculada, então, como:

$$\Delta P_{r,n,atrito} = F_{PD} \times \Delta P_{r,atrito} \quad (\text{em kPa}) \quad (3)$$

O valor de $\Delta P_{r,atrito}$ é calculado através das correlações de perda de carga existentes na literatura para refrigerantes puros.

A expressão (1) chegou a uma precisão de 99% para um desvio de $\pm 5\%$ em relação aos resultados experimentais. Além disso, combinando-se essa expressão à correlação de Friedel (1979) para perda de carga em refrigerantes, obteve-se uma precisão de 92% com desvio de $\pm 15\%$. É importante notar, porém, que apesar de a correlação de Friedel ser a mais utilizada e menos imprecisa, ela pode fornecer erros de até 40%.

Devido à ausência de outros experimentos para a combinação R-113-CuO, a expressão do fator de impacto parece suficientemente consistente e precisa para o uso neste trabalho. Logo, os cálculos e análises consequentes serão baseados na qualidade dessa expressão.

5. Metodologia

5.1. Hipóteses e restrições do modelo

Admitem-se as seguintes hipóteses para que a correlação de Peng et al. possa ser aplicada corretamente no modelo proposto por Fiorelli (2000):

- Escoamento em regime permanente, ou seja, efeitos de transição desprezíveis;
- Escoamento em regime turbulento plenamente desenvolvido;
- Escoamento horizontal, ou seja, efeitos de perda de carga estática desprezíveis;
- Escoamento unidimensional sem presença de surfactante;
- Deposição e coagulação de nanopartículas no tubo desprezíveis (devido à turbulência);
- Fase líquida e vapor em equilíbrio termodinâmico;
- Condução de calor nas paredes do tubo capilar na direção axial desprezível;
- Admite-se a possibilidade de troca de calor entre tubo capilar e meio externo;
- Coeficiente de troca de calor com o meio constante;
- Modelo de fases separadas.

5.2. Perdas de carga

As perdas de carga total de uma mistura refrigerante-nanopartícula ao longo de um tubo capilar pode ser dividida em três partes, como indica a equação (4) a seguir:

$$\Delta P_{r,n,total} = \Delta P_{r,n,atrito} + \Delta P_{r,n,estat} + \Delta P_{r,n,acel} \quad (\text{em kPa}) \quad (4)$$

$\Delta P_{r,n,total}$ é obtido experimentalmente através de sensores na entrada e na saída do tubo capilar. Utilizando-se a hipótese de escoamento horizontal, tem-se que:

$$\Delta P_{r,n,estat} = 0 \text{ kPa} \quad (5)$$

$\Delta P_{r,n,acel}$, a perda de carga devido à aceleração do fluido, é calculada como:

$$\Delta P_{r,n,acel} = G^2 \left\{ \left[\frac{x^2}{\rho_{r,n,V} \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_{r,n,L} (1-\alpha)} \right]_s - \left[\frac{x^2}{\rho_{r,n,V} \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_{r,n,L} (1-\alpha)} \right]_e \right\} \quad (\text{em kPa}) \quad (6)$$

Admite-se que a maior parte das nanopartículas permanece no estado líquido da mistura. Logo, a massa específica do estado de vapor saturado da mistura refrigerante-nanopartícula, $\rho_{r,n,V}$, pode ser simplificada para a massa específica de vapor saturado do fluido refrigerante. Por sua vez, a massa específica da mistura no estado de líquido saturado, $\rho_{r,n,L}$, fica:

$$\rho_{r,n,L} = \frac{(1-x+x\omega)\rho_{r,L}\rho_n}{\omega\rho_{r,L} + (1-x)(1-\omega)\rho_n} \quad (\text{em kg/m}^3) \quad (7)$$

ω é a fração mássica das nanopartículas em kg de CuO/kg de mistura.

5.3. Fração de vazio α

Para que os experimentos de Peng e Fiorelli sejam válidos entre si, é necessário verificar que as hipóteses adotadas e os modelos de cálculo de ambos sejam equivalentes. Peng et al. (2009) estimou a fração de vazio α pelo modelo de Steiner (1993) para escoamento de refrigerantes em tubos horizontais. Por outro lado, o modelo matemático usado por Fiorelli (2000) para a fração de vazio utiliza a correlação de Premoli (Premoli et al., 1971) para o cálculo das tensões superficiais de misturas de fluidos refrigerantes.

5.4. Cálculo da perda de carga devido ao atrito

Podemos obter o valor esperado da perda de carga por atrito isolando-se este fator na equação (3):

$$\Delta P_{r,n,atrito} = \Delta P_{r,n,total} - \Delta P_{r,n,acel} \quad (\text{em kPa}) \quad (8)$$

Para um escoamento turbulento totalmente desenvolvido em um tubo, esta relação também pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P_{r,n,atrito} = f_{lo} \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2}, \text{ ou } \frac{\Delta P_{r,n,atrito}}{L} = \frac{f_{lo}}{D} \rho \frac{V^2}{2} \quad (\text{em kPa}) \quad (9)$$

V , a velocidade do fluxo da mistura, também pode ser escrita como:

$$V = \frac{G}{\rho} \quad (\text{em m/s}) \quad (10)$$

Então, a relação fica:

$$\frac{\Delta P_{r,n,atrito}}{L} = \frac{f_{lo}}{D} \frac{G^2}{2\rho} \quad (\text{em kPa/m}) \quad (11)$$

Assim, precisa-se determinar o fator de atrito f . No modelo de fases separadas, o fator de atrito pode ser admitido como se o fluxo total fosse monofásico (geralmente admite-se líquido). Para a correção para o modelo bifásico, multiplica-se o resultado obtido por uma correlação obtida experimentalmente. A discussão sobre o multiplicador bifásico adotado é feita na próxima seção.

O fator de atrito pode ser obtido através do Diagrama de Moody, que relaciona f com a rugosidade relativa e/D e a turbulência (expressa pelo número de Reynolds). Sabendo-se que a rugosidade absoluta e utilizada para o cobre é de 0,0015 mm, encontramos $e/D=0,000185$, então $f_{lo}=0,0136$.

5.5. Cálculo do multiplicador bifásico

Conforme Collier and Thome (1996), o gradiente da pressão devido ao atrito para um escoamento bifásico pode ser escrito como o produto do gradiente de pressão para um fluxo monofásico por um fator multiplicador ϕ_{lo}^2 , como indicado a seguir:

$$\left(\frac{dp}{dz} F \right) = - \frac{f_v G^2}{2d_{tc}} = \frac{f_{lo} G^2}{2d_{tc} \rho_l} \phi_{lo}^2 \quad (\text{em kPa/m}) \quad (12)$$

Onde f_{lo} é o fator de atrito para o fluido puro em fase de líquido saturado, calculado na seção anterior, e ϕ_{lo}^2 é o multiplicador bifásico.

Existem diversos métodos baseados em resultados empíricos que permitem calcular ϕ_{lo}^2 . Fiorelli e Peng propõem duas correlações distintas.

Peng et al. (2009) propõe o uso da correlação de Friedel (1979) para o estudo comparativo da correlação proposta por ele. Por outro lado, a correlação de Li é utilizada por Fiorelli. Mais uma vez, embora os dois métodos são válidos, privilegiaremos a correlação utilizada por Fiorelli para a validação do estudo de Peng e para o estudo comparativo consequente. Ressalta-se que para ambas todas as correlações apresentadas, é aceitável esperar-se desvios de até 40% (cf. Collier and Thome, 1996)., uma vez que estas correlações foram obtidas a partir de um número limitado de experimentos com alguns refrigerantes.

6. Estudo Comparativo

6.1. Fração de vazio

Inicialmente, devem-se comparar os resultados alcançados com os diferentes métodos de cálculo da fração de vazio, o que afeta o valor do gradiente de pressão obtido. A comparação entre a equação de Premoli (Fiorelli) e a equação de Steiner (Peng) fornece a Figura 1:

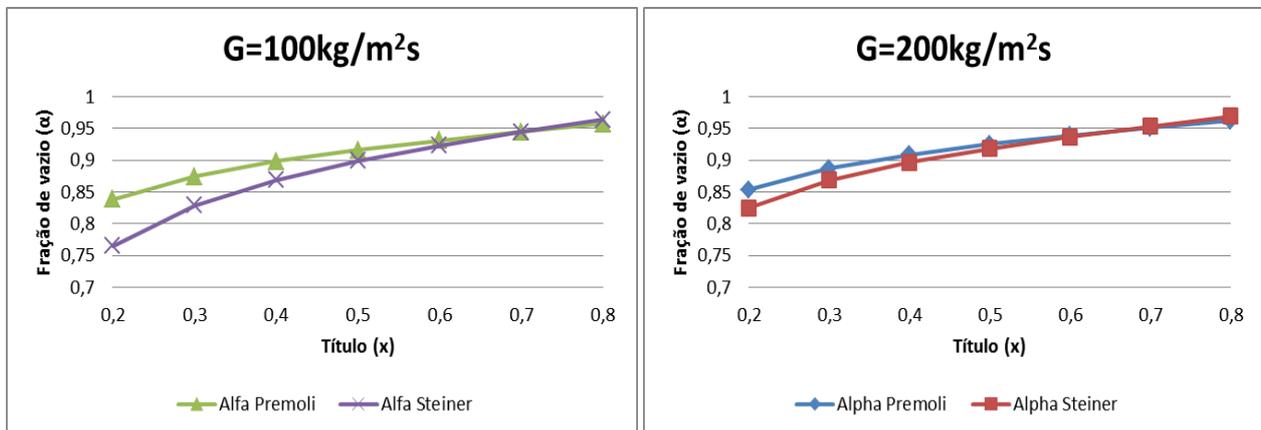


Figura 1: Comparativo do cálculo das frações de vazio entre a equação de Premoli e de Steiner para G=100 e 200kg/m²s

A maior diferença encontrada entre os resultados foi de 9,6% para G=100 kg/m²s e x=0,2. Constata-se que o valor da fração de vazio de Premoli tende a ser maior para títulos de até 0,6, sendo aproximadamente igual ao alpha de Steiner em 0,7 e menor a partir deste ponto. Conclui-se por cálculos que quanto maior o valor de α , maior a parcela da perda de carga devido à aceleração. Logo, da equação (8), para um mesmo valor experimental de $\Delta P_{r,n,total}$, quanto maior a parcela devido à aceleração, menor será a parcela correspondente ao atrito. Portanto, como Peng utilizou a fração de vazio de Steiner, deve haver uma tendência de se encontrarem valores de gradiente de pressão menores que os encontrados pelo modelo de Premoli para o caso de títulos menores que 0,7. Entretanto, essa diferença será negligenciada, já que se observa pela Figura 1 que a diferença entre os dois modelos é neutralizada a vazões maiores que 200kg/m²s, como é o caso da simulação realizada.

6.2. Perda de carga por atrito

Após a parametrização de escala dos resultados gráficos do artigo com os resultados do aplicativo, constatam-se os seguintes resultados:

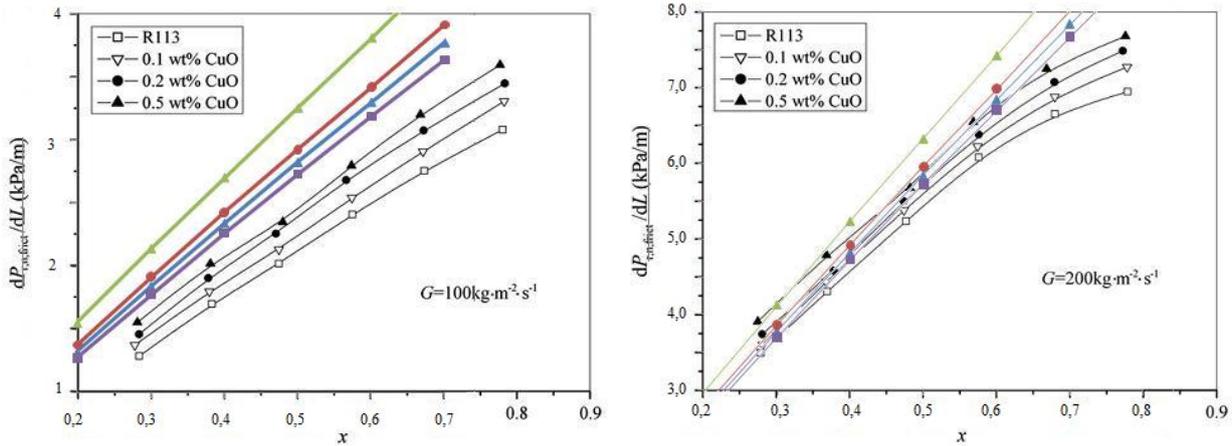


Figura 2: Gradiente de pressão em função do título para $G=100$ e $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

No caso da variação do gradiente de pressão com o título para diferentes fluxos mássicos, percebe-se que o modelo tende a estimar os valores acima do esperado, especialmente para baixas vazões (100 e $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$) e títulos acima de $0,7$. O erro nesses casos é consideravelmente alto, chegando a até 50% . Entretanto, o modelo parece bastante adequado para vazões maiores ($200 \text{ kg/m}^2\text{s}$) e valores de título entre $0,3$ e $0,5$, conforme mostra a Figura 2. Esses resultados ficaram ligeiramente acima do limite de 35% de desvio estabelecido pelo autor, porém vale lembrar que foram utilizadas correlações para o multiplicador de atrito diferentes das propostas por Peng para se adequar ao modelo numérico. Além disso, como observado anteriormente, sabe-se que a desvio aceitável pelas correlações utilizadas é tal que os resultados obtidos são aceitáveis para se afirmar que a comparação dos dois modelos é válida, especialmente para a faixa de vazões que será analisada.

6.3. Fator de impacto

Os resultados para o fator de impacto das nanopartículas são mostrados a seguir:

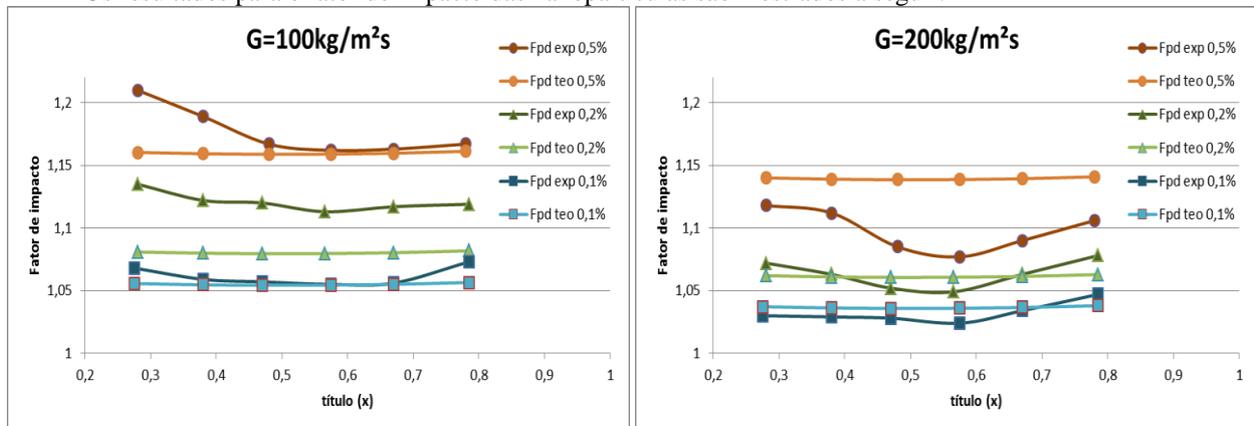


Figura 3: Correlação de atrito de Peng em função do título para $G=100$ e $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Constata-se pela Figura 3 que novamente que o desvio dos resultados de Peng com os obtidos numericamente diferiram além do estipulado pelo autor, embora estejam muito próximos do limite. Utilizando-se a mesma escala de Peng, encontraram-se diferenças de até 6% , ou seja, apenas 1% a mais do que o limite proposto. Assim como observado pelo autor, os maiores desvios foram encontrados para a composição de $0,2\%$ em massa de nanopartículas de CuO. Uma possível causa dessa diferença é o fato de que o fator de impacto proposto é considerado diretamente proporcional à fração mássica da nanopartícula, o que não se comprova pelos resultados experimentais. Nos resultados experimentais, as distâncias entre os valores para composições de $0,1\%$ e $0,2\%$ de CuO é aproximadamente igual à diferença entre as composições de $0,2\%$ e $0,5\%$. Finalmente, pode-se concluir que o modelo de Peng é consistente com o programa de simulação numérica em EES, tornando válidos os valores experimentais obtidos por Peng entre $G=100$ e $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

7. Revisão da correlação de atrito

Embora o modelo de Peng tenha se mostrado coerente com o de Fiorelli, uma análise preliminar dos resultados obtidos pelo código desenvolvido por Fiorelli mostrou que a expressão da correlação de atrito apresentava valores

menores do que 1,0 dentro da faixa de variação dos parâmetros utilizada neste trabalho. Isso indicaria que as nanopartículas reduziriam a perda de carga ao longo do tubo capilar, o que seria incoerente do ponto de vista teórico.

Observou-se que o resultado suspeito da correlação de atrito se deve principalmente a dois parâmetros que tem uma variação importante entre os trabalhos de Peng e Fiorelli:

- O diâmetro do tubo, que é cerca de 10 vezes maior no experimento em relação à tese de Fiorelli. Como resultado, o termo do diâmetro do tubo na correlação de Peng fica desproporcional em relação à influência do título e da fração de nanopartículas.
- O fluxo de massa do experimento de Fiorelli é aproximadamente 10 vezes maior que a utilizada por Peng. Devido ao modo como G é expresso na fórmula proposta, existe um limite de G a partir do qual a relação inevitavelmente resultará em um valor menor do que 1. Observou-se que a correlação passa a dar um valor menor do que 1,0 já a partir de $G=330\text{kg/m}^2\text{s}$ dentro das condições do experimento de Peng.

Pelas razões expostas anteriormente, foi necessário buscar-se uma nova expressão para a correlação de atrito que satisfizesse tanto os resultados experimentais de Peng quanto fosse coerente com os resultados obtidos numericamente no modelo de Fiorelli. Após o cálculo de uma regressão utilizando o EES, a expressão obtida foi:

$$F_{PD} = 1,002 \frac{9000 d_n}{D_i} \cdot 1,001^{0,0002 \rho_n \cdot v_i} \cdot 1,036 \frac{100}{G} \cdot 1,022 \left[\frac{0,12}{x \cdot (1-x)} \right] \cdot 1,03^{(800\omega)} \quad (13)$$

Nota-se que os valores de cada termo não podem ultrapassar 1 independentemente dos valores das incógnitas. A Figura 4 mostra os resultados da correlação do atrito e a diferença em relação ao valor experimental de Peng. Assim como a expressão original, o erro dessa fórmula é menor que 5% em 90% dos casos, o que valida a utilização dessa expressão para substituir a correlação original.

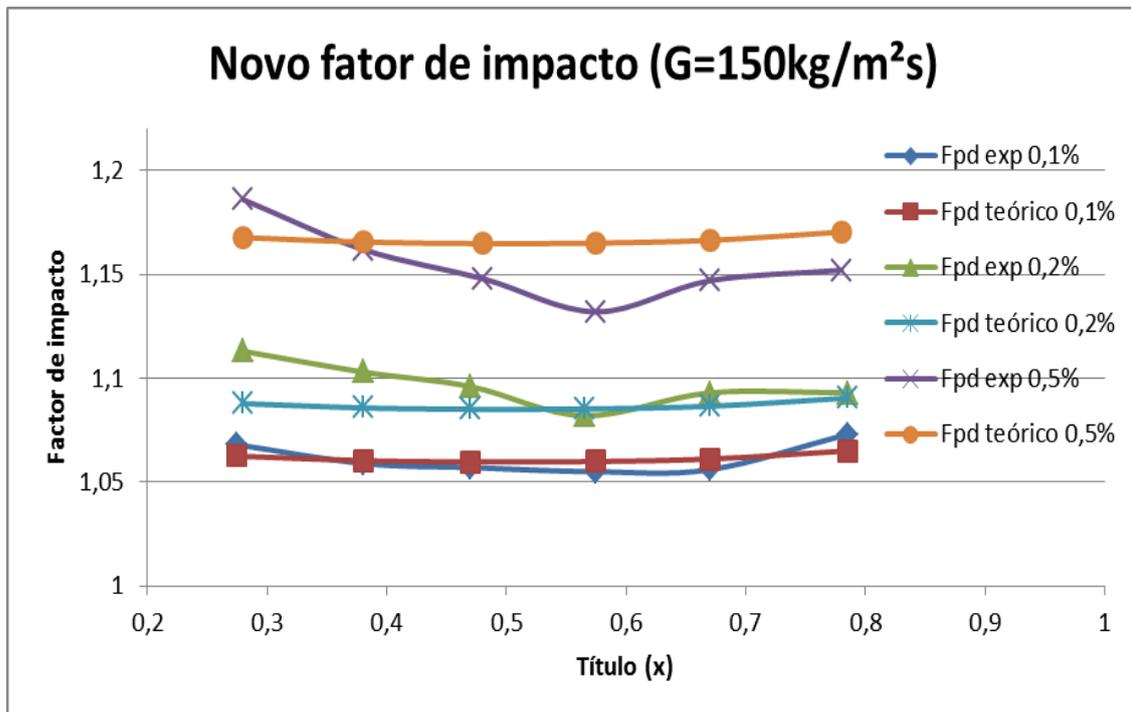


Figura 4: Nova correlação de atrito em função do título para $G=150\text{kg/m}^2\text{s}$

8. Simulação e análise

8.1. Análise preliminar

Em primeiro lugar, foi realizado um trabalho de verificação do funcionamento do programa por meio da variação de alguns parâmetros como temperatura de entrada (denominada T_1) e diferença de temperatura de subresfriamento, seguida de uma simulação. Uma vez verificada a consistência da correlação do fator de perda de carga dentro das hipóteses do modelo de Fiorelli, em uma determinada faixa de temperatura e pressão, buscou-se realizar as modificações necessárias no programa de simulação de modo a levar em consideração a presença de nanopartículas no fluido refrigerante.

Desse modo, é possível comparar tanto o efeito do fator de impacto devido à presença de óxido de cobre na mistura quanto o comportamento do fluido sob condições de operação diferentes.

Para o escopo deste trabalho, foi utilizado o programa de simulação para o caso do refrigerante R-134a. Os seguintes valores operacionais originais do trabalho de Fiorelli foram mantidos em todas as simulações:

- Pressão atmosférica (p_{atm}): 700 mmHg;
- Temperatura de evaporação (T_{ev}): -25°C ;
- Temperatura do ambiente (T_{amb}): 25°C ;
- Diâmetros de entrada e saída do tubo (D_{cd} e D_{ev}): 6 mm.
- Diâmetro da nanopartícula (d_n): 40 nm;
- Massa específica da nanopartícula (ρ_n): 6320 kg/m^3 .

Além disso, para efeito de comparação, foram definidos os seguintes valores de referência para os parâmetros variáveis:

- Temperatura de condensação (T_{cd}): 55°C ;
- Título inicial (x_1): nulo (foi utilizado no programa $x_1=0,001$ para evitar inconsistências numéricas);
- Comprimento do tubo (L): 2,757 m;
- Diâmetro do tubo capilar (D_i): 0,762 mm.

Os resultados preliminares da simulação indicaram que a diferença de pressão ao longo do tubo é discretamente maior quando há presença de CuO, como esperado, entretanto, esta não passou de 0,67%.

Após a validação do programa a partir dos resultados anteriores, foi feita uma série de simulações para avaliar a influência do fator de impacto sobre cada parâmetro operacional do tubo capilar.

8.2. Influência sobre o título ao longo do tubo capilar

Foram extraídos resultados para o título, a temperatura e a pressão ao longo de 30 trechos do tubo capilar para $T_1=40^{\circ}\text{C}$ e 55°C , variando o grau de subresfriamento de 4,5 a $2,5^{\circ}\text{C}$. Pode-se observar que, como esperado, a fração de título para o caso em que há presença de nanopartículas é menor que na mistura sem nanopartícula, dada uma mesma posição do tubo capilar. Nota-se, portanto, um ligeiro “atraso” no início da aparição da fase vapor quando a mistura é um nanofluido. O atraso para o início da vaporização devido ao impacto das nanopartículas foi menor quanto maior o grau de subresfriamento, variando de 1,55% para $\Delta T_{sub}=5^{\circ}\text{C}$ a 2,64% para $\Delta T_{sub}=2,5^{\circ}\text{C}$, a $T_1=40^{\circ}\text{C}$. Para a temperatura de condensação $T_1=55^{\circ}\text{C}$, o atraso foi entre 1,79% ($\Delta T_{sub}=5^{\circ}\text{C}$) e 2,60% ($\Delta T_{sub}=2,5^{\circ}\text{C}$).

A Figura 5 mostra que a diferença entre a posição de início da vaporização no tubo com nanofluido aumenta com o quanto maior o grau de subresfriamento. Além disso, as variações são maiores no início do resfriamento e a diferença diminui a zero no final do tubo, como esperado, uma vez que foi fixada a temperatura (logo, a pressão) de evaporação na saída.

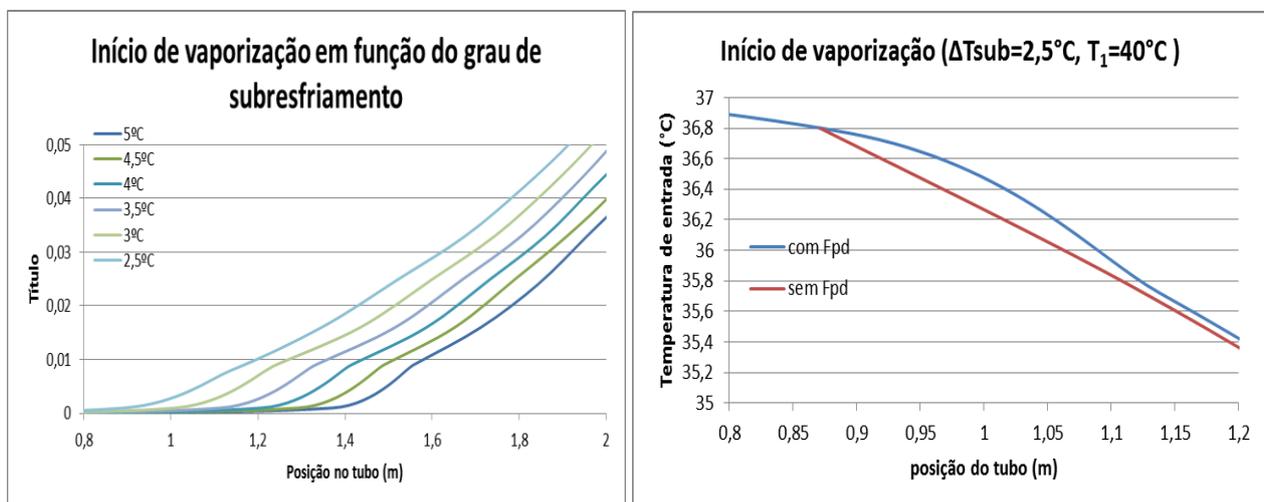


Figura 5: (a) Trecho ampliado indicando início da vaporização em função do grau de subresfriamento e (b) diferença do início da vaporização quando há presença de nanopartículas

8.3. Influência sobre a vazão mássica em função do grau de subresfriamento

Foi investigada a variação da vazão mássica do tubo capilar em função do grau de subresfriamento com e sem o fator de impacto. Fixando a temperatura de condensação em 40°C , houve perda de em média 0,77% do valor do fluxo necessário devido à presença de nanopartículas, e a perda percentual é a mesma (0,77%) para os cenários em que a temperatura de condensação é 55°C , como mostra a Figura 6. Isso indica que a perda depende exclusivamente ou primordialmente do grau de resfriamento, e não das temperaturas absolutas de entrada no tubo capilar.

Pode-se observar também que a diferença entre o fluxo de massa com e sem a nanopartícula aumenta percentualmente quanto menor o grau de subresfriamento. Isso se deve provavelmente ao fato de que a variação de temperatura (e pressão) a ser vencida é menor quanto maior é o grau de subresfriamento.

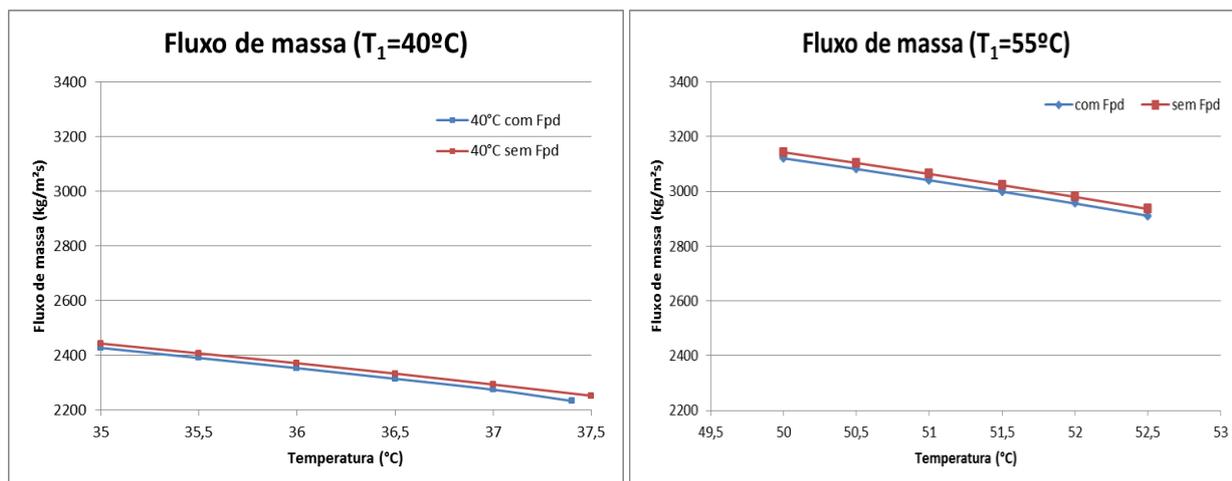


Figura 6: Variação do fluxo de massa em função do grau de subresfriamento para $T_1=40^\circ\text{C}$ e 55°C

8.4. Influência sobre a vazão mássica em função do título de entrada

Observa-se que o fluxo de massa decresce com o aumento do título de entrada. Ao variar a fração de título na entrada do tubo capilar, foi observada uma modificação no fluxo de massa média aproximadamente constante 0,67% menor quando há presença de nanopartículas, como indica a Figura 8a. Destaca-se também o fato de que o aumento do título na entrada foi o fator mais importante para queda do fluxo de massa, dentro da faixa de valores analisados. A diferença entre o fluxo de massa para título de entrada nulo e $x=0,1$ chegou a 33%.

Percebe-se também pela Figura 8b que o fator de impacto se reduz gradativamente no sentido do escoamento do fluido no tubo. Além disso, o fator de impacto diminui com o aumento do título na entrada do tubo. A redução do efeito das nanopartículas com o aumento do título poderia ser justificada pelo fato do fenômeno de mistura entre as fases líquida e vapor no tubo afetar mais drasticamente o escoamento e as propriedades do fluido no tubo, sendo, portanto, mais relevante para eventuais perdas de carga. Por esse raciocínio, a nanopartícula teria um efeito maior quando a mistura for “menos” bifásica, que é o que se observa nos resultados da simulação.

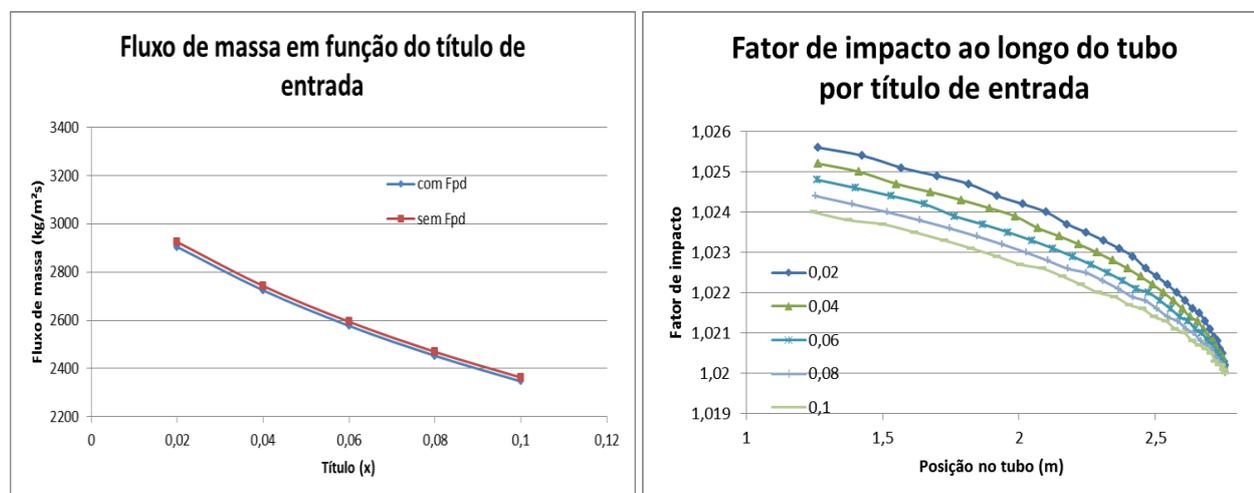


Figura 8: (a) Queda do fluxo mássico com aumento do título na entrada do tubo e (b) Queda do fator de impacto ao longo do tubo e para valores crescentes de título.

8.5. Influência sobre o diâmetro do tubo capilar em função do fluxo de massa

A Figura 9a mostra a tendência do fluxo mássico de diminuir com a redução do diâmetro do tubo. Para o diâmetro de referência de 0,792 mm, a redução da vazão foi de cerca de 0,70% enquanto que para um diâmetro menor de 0,500 mm há uma redução do fluxo de massa de 0,51% com a introdução de nanopartículas. Logo, existe uma tendência de as nanopartículas terem um impacto maior quanto maior o diâmetro do tubo, o que poderia ser justificado pela turbulência.

8.6. Influência sobre o comprimento do tubo em função do fluxo de massa

Observa-se pela Figura 9b que a vazão mássica decresce com o aumento do comprimento do tubo, como previsto por Fiorelli. O fator de impacto, nesse caso, causa uma variação no fluxo mássico aproximadamente constante de 0,70% em média.

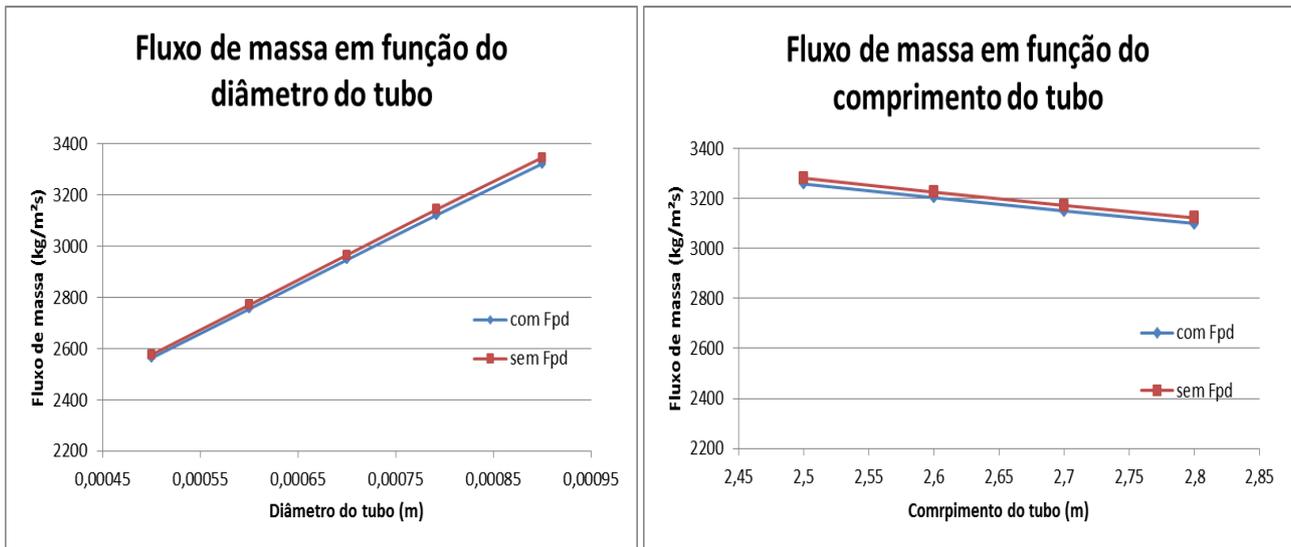


Figura 9: (a) Fluxo de massa em função do diâmetro do tubo capilar e (b) do comprimento do tubo capilar

8.7. Influência da fração mássica de nanopartículas

A fração de nanopartículas presentes no fluido-base tem efeito significativo na perda de carga no tubo capilar. As Figuras 11a e 11b mostram que uma variação de 0,1% a 0,4% na quantidade de nanopartículas eleva o fator de impacto de aproximadamente 8% e reduz em 7,35% o fluxo de massa, valores significativos que provavelmente afetarão as condições operacionais do sistema.

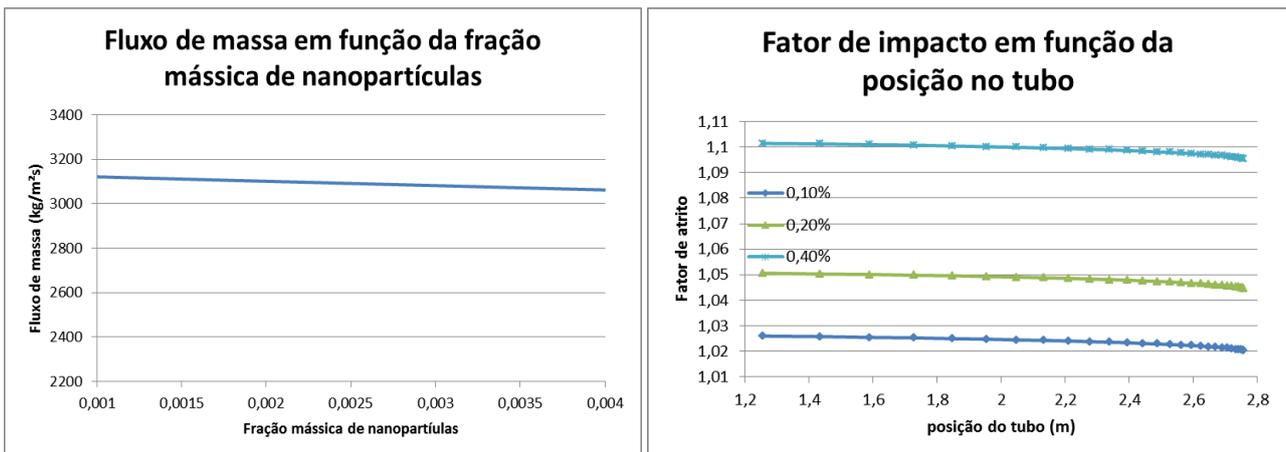


Figura 11: (a) Variação do fluxo de massa em função da fração mássica de CuO e (b) Fator de impacto em função da posição do tubo para diferentes frações mássicas de CuO

9. Conclusões

A primeira parte do trabalho buscou inicialmente abranger da maneira mais clara possível o contexto atual da aplicação de nanopartículas em fluidos refrigerantes. Tendo em vista as limitações bibliográficas desse ramo expoente da engenharia de refrigeração, foi necessário realizar uma análise mais detalhada das premissas utilizadas pelos pesquisadores nesse assunto.

Focou-se na publicação do grupo de pesquisa de Peng et al. (2009), o qual foi identificado como um dos únicos trabalhos experimentais que procuram descrever o efeito da perda de carga por atrito devido à introdução de nanopartículas no fluido refrigerante. Em seguida, compararam-se os dados obtidos por estes autores com os dados obtidos por Fiorelli (2000).

As primeiras análises realizadas sobre a fração de vazio, o gradiente de pressão e o fator de impacto mostram que os resultados do experimento de Peng e o modelo proposto por estes autores estão dentro das expectativas tanto dos próprios quanto para aplicação no modelo numérico de Fiorelli.

Em seguida, foi feito o estudo e a adaptação do programa em EES para tubos capilares desenvolvido pelo Prof. Fiorelli. Este modelo numérico do fluxo de refrigerante em tubos lisos serviu como referência para as adaptações a serem feitas no programa de modo a acrescentar a presença de nanopartículas de CuO.

Devido às distintas condições operacionais entre o experimento de Peng e o de Fiorelli, percebeu-se a limitação da correlação de perda de carga de Peng e estabeleceu-se uma nova expressão que satisfaz tanto as condições de baixo fluxo de massa ($G=100$ a $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$) até fluxos de massa encontrados em tubos capilares de refrigeração ($G=2000$ a $10000 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

Diversos cenários foram simulados de modo a determinar os principais parâmetros que são afetados pela presença das nanopartículas. A partir dos dados coletados, pode-se concluir que o nanofluido efetivamente contribuiria para a perda de carga no tubo, uma vez que é exigida uma vazão mássica menor para realizar a mesma queda de pressão (fixadas as pressões de condensação na entrada e evaporação na saída do tubo). Vale destacar que em todos os casos estudado foi observada a ocorrência de bloqueio na saída do tubo, ou seja, o escoamento é crítico e, portanto, o efeito da pressão (e temperatura) de evaporação na saída do tubo capilar pode ser considerado irrelevante.

Dentre as características que mais contribuem para o aumento da perda de carga (e consequente redução da vazão mássica) devido à presença de nanopartículas, destacam-se as dimensões do tubo capilar (comprimento e diâmetro), o título e o grau de subresfriamento na entrada. Os dois últimos parâmetros contribuem diretamente com o comprimento do trecho líquido no tubo e o consequente início da vaporização, chegando a um atraso de vaporização de até 2,65% para uma fração mássica de CuO de 0,1%. Enquanto isso, dentro da faixa de operação analisada, o comprimento e o diâmetro do tubo podem reduzir o fluxo de massa em até 0,72%. Além disso, a tendência é que essa redução aumente quanto maior for o diâmetro do tubo.

Logo, é possível concluir a partir deste trabalho que os nanofluidos tem efeito relevante na perda de carga, sendo recomendado um estudo prévio dos efeitos das nanopartículas durante o projeto de um sistema de refrigeração que utiliza tubos capilares.

10. Referências

- Collier, J.G.; Thome, J.R. **Convective Boiling and Condensation**. 3rd ed. Oxford Science Publications, Oxford, 1996.
- Fiorelli, Flavio A.S. **Análise do escoamento de fluidos refrigerantes alternativos ao HCFC 22 em tubos capilares adiabáticos**. São Paulo, 2000.
- Friedel, L., 1979. **Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow**. European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2, June, Ispra, Italy.
- Premoli, A.; Di Francesco, D.; Prina A., **Una correlazione adimensionale per la determinazione della densità di miscele bifasiche**. La Termodinamica 25 (1971).
- Peng, H (Peng, Hao); Ding, GL (Ding, Guoliang); Jiang, WT (Jiang, Weiting); Hu, HT (Hu, Haitao); Gao, YF (Gao, Yifeng). **Measurement and correlation of frictional pressure drop of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube**. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION-REVUE INTERNATIONALE DU FROID, 32 (7): 1756-1764 NOV 2009

11. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE FLOW OF NANOFLUIDS IN CAPILLARY TUBES

Allison Massao Hirata

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
allison.hirata@gmail.com

Abstract. *This work presents the results of the analysis on the use of nanoparticle in refrigerant-based fluids and its effects on pressure drop in capillary tubes. Such effect has not been investigated even though interest in nanofluids as an alternative to chlorofluorocarbon refrigerants is increasing. Analysis on the effect of nanoparticles was done through numerical simulation software for flow in capillary tubes and using a new correlation model for the effect of nanoparticles on pressure drop. The correlation model proposed in this work can be applied for a wider range of mass flows than the correlation found in the literature and presents approximately the same accuracy when compared with the experimental results. Several parameters such as initial temperature, initial vapor pressure, diameter and length of the tube as well as weight fraction of nanoparticle have been varied and compared. It has been observed reductions due to the presence of the nanoparticles within the analysed range up to 0,86% for $w=0,1\%$ wt. CuO and 7,35% for $w=0,5\%$ wt. CuO. Mass flux decreases approximately linearly as tube diameter increases. Vapor pressure and tube length influences are approximately constant, regardless of its range, at around 0,6% to 0,7% for $w=0,1\%$ wt. CuO. Also, it was possible to capture the effect of delay in vaporization within the tube due to the presence of nanoparticles.*

Keywords. *Nanofluids, refrigerant, pressure drop, capillary tubes, simulation*