

Estudo dos padrões de escoamento bifásicos em tubulações horizontais para aplicação em refrigeração

Study of biphasic flow patterns in horizontal pipes for cooling application

RESUMO

Pablo Jesus Alves de Paula
pabloj@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
raqueld@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil

O uso de fluídos como refrigerantes em sistemas de refrigeração é amplamente difundido, para tanto, o fluido passa por diversas mudanças de fase dentro do sistema. Enquanto escoar pelos tubos do evaporador, o fluido adquire calor do ambiente refrigerado e muda da fase líquida para a gasosa. Entretanto, essa mudança não é instantânea e leva o fluido a escoar com a presença de duas fases. Esse escoamento bifásico possui interferência direta na transferência de calor do meio refrigerado para o líquido. Desse modo, é necessário conhecer os padrões do escoamento para otimizar a transferência de calor. Ainda que o escoamento com mais de uma fase possa ser demasiadamente complexo foi possível realizar algumas modelagens, mesmo com limitações, para que se criassem mapas de arranjos de fase. A partir da implementação da modelagem de Taitel e Dukler foi possível identificar o padrão, o que possibilitará entender a influência deste na formação de gelo poroso em superfícies refrigeradas.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento multifásico. Transferência de Calor. Evaporadores.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

The refrigerant used on cooling system it's very common, therefore, the fluid go trough several phase transformations in the system. When it flows in the evaporator pipes, it receive heat of de cooling area and it changes phase from liquid to gas. However, this change it isn't instantaneous and it makes the fluid to flow as biphasic. This biphasic flow have some direct influence on the heat transfer of the cooling area to the fluid. Therefore, it's necessary to know the flow fluid patterns for optimize the heat transfer. Even that the flow with more than one phase can be hard to analisys, some modeling could be made, with some limitations, for a phase patter map. From the implemetantion of the Taitel and Dukler model became possible to indentify the flow patter, that will make less hard to understand the influence of this patterns in the frost formation on cooling surfaces.

KEYWORDS: Multiphase flow. Heat transfer. Evaporator.

INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos possuem uma dependência bidirecional entre a geometria do escoamento e o escoamento das fases. Esse comportamento faz com que a análise do escoamento seja extremamente complexa. As alterações na geometria do escoamento possuem influência na transferência de massa, quantidade de movimento e energia, justificando a necessidade do estudo sobre a geometria do escoamento. Contudo, mesmo com tal complexidade, a modelagem matemática desses problemas e subseqüentes simulações dessas possibilitam um melhor entendimento sobre a geometria. Vale ressaltar que o campo ainda possui diversos tópicos a serem abordados.

Dito isso, um ponto de partida para o estudo das geometrias dos escoamentos pode se dar com escoamentos bifásicos em dutos. As modelagens executadas nessa área permitem que se identifique determinados comportamentos físicos do escoamento e levou a introdução de mapas de arranjos de fases.

MATERIAIS E MÉTODOS

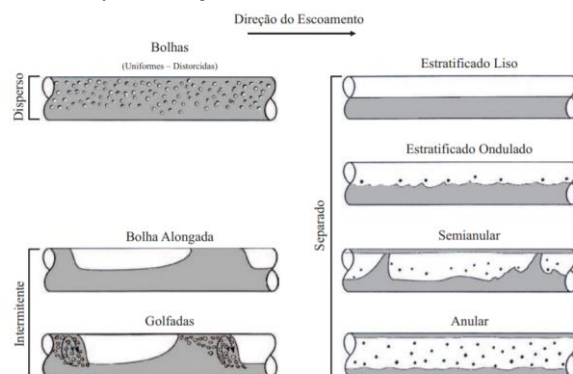
Escoamentos bifásicos são, em síntese, escoamentos que apresentam um mesmo elemento em duas diferentes fases. Um exemplo simples seria um copo d'água com cubos de gelo em um tubo. Contudo, é comum também que hajam escoamentos em que a interface é líquido-gás.

Podemos encontrar sistemas bifásicos em escoamentos de dutos de petróleo, em reatores nucleares (principalmente em procedimentos de segurança), usinas geotérmicas, indústria espacial e indústria química e de processos industriais. Nesse último caso podemos ressaltar que as mudanças de fase acontecem tanto no produto quanto em aparatos como caldeiras, evaporadores, condensadores e outros trocadores de calor.

Em sistemas de refrigeração sistemas bifásicos são encontrados em condensadores e evaporadores. Os evaporadores são trocadores de calor que absorvem o calor do ambiente refrigerado, transferindo-o para o gás refrigerante que escoar por tubos e muda de fase durante o processo.

Abaixo Lima (2011, p. 3) nos mostra um padrão de tubos horizontais proposto por Taitel e Dukler (1976) e depois subdividido por Shoham (2006).

Figura 1 – Representação dos Padrões de Escoamento Bifásico.



Fonte: Lima (2011).

Aniceto (2008, p. 17) apud Taitel e Dunkler (1976) descreve alguns dos padrões de escoamento, que podem ser vistas no quadro abaixo:

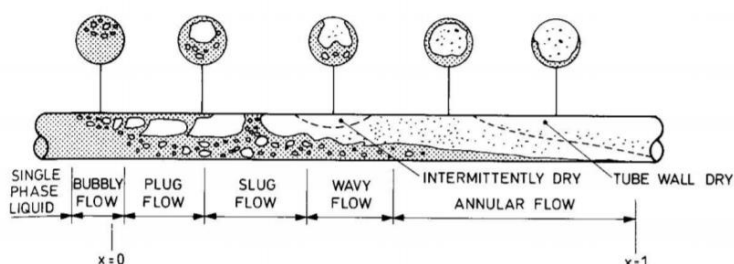
Quadro 1 – Descrição dos Padrões de escoamento

Padrão de escoamento	Descrição
Estratificado	Separação total das fases líquidas e gasosa pela ação da gravidade com escoamento contínuo das fases
Ondulado	Ondas na superfície da fase líquida causadas pelo aumento da velocidade da fase gasosa em escoamento estratificado
Golfadas	Com mais velocidade as ondas passam a ocupar toda a sessão transversal do tubo, com algumas bolhas
Bolhas Alongadas	Ocorre a separação definida das golfadas em bolsas de gás, e as bolhas se deslocam, geralmente, no topo do tubo
Bolhas	A fase gasosa se encontra dispersa no líquido
Anular	Ocorre com alto fluxo de gás, faz com que o líquido se desloque para as paredes do tubo

Fonte: Autoria própria (2019).

Lima (2011) apud Shoham (2006) ainda nos lembra que o padrão semianular constitui uma transição para o padrão anular. Quibén (2005) ainda nos mostra uma representação esquemática de um tubo aquecido por um fluxo uniforme de calor contendo um fluido líquido próximo a temperatura de saturação.

Figura 2 – Representação esquemática da transição entre padrões de escoamento.



Fonte: Quibén (2005).

Nesse esquema é possível notar as transições dos padrões de escoamento à medida que o líquido recebe calor. Os padrões seguem de líquido em uma fase, bolhas, golfadas, ondulado e anular, até que se torne uma fase gasosa.

Após alguns estudos, em 1954, Baker investigou a dependência dos padrões de escoamento com o fluxo e frações volumétricos e as propriedades dos fluidos, criando o primeiro Mapa de Arranjos de Fases. Em 1974, Mandhane et al. Propôs um mapa que utilizava a velocidade superficial das fases de líquido e gás. Esse mapa foi elaborado a partir de dados da mistura água-ar.

Taitel e Dukler propuseram em 1976 um mapa baseado nos mecanismos de transição de fluxo com a seleção empírica de vários parâmetros. Eles usaram o Parâmetro de Martinelli X (1), o Número de Froude do gás FrG (2) e os parâmetros T (3) e K (4), definidos abaixo:

$$X = \left[\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$Fr_G = \frac{G_G}{[\rho_G(\rho_L - \rho_G)D_g]^{1/2}} \quad (2)$$

$$T = \left[\frac{|(dp/dz)_L|}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

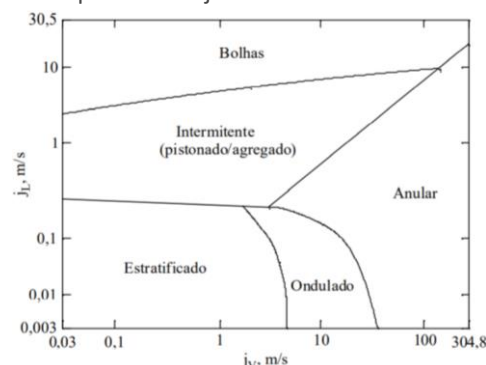
$$K = Fr_G Re_L^{1/2} \quad (4)$$

Podemos entender melhor o papel de cada parâmetro a partir da explicação:

To implement the map, one first determines the Martinelli parameter X and Fr_G . Using these two parameters on the top graph, if their coordinates fall in the annular flow regime, then the flow pattern is annular. If the coordinates of X and Fr_G fall in the lower left zone of the top of the graph, then K is calculated. Using K and X in the middle graph, the flow regime is identified as either stratified-wavy or fully stratified. If the coordinates of X and Fr_G fall in the right zone on the top graph, then T is calculated. Using T and X in the bottom graph, the flow regime is identified as either bubbly flow or intermittent (plug or slug) flow. (Quibén, 2005, p.41)

Na Figura 3 podemos ver a representação gráfica do Mapa de Arranjo de Fases proposto por Taitel e Dukler (1976).

Figura 3 – Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler



Fonte: Bueno (2004, p.25) *apud* Taitel e Dukler (1976).

Com a evolução dos estudos sobre sistemas bifásicos, melhor compreensão dos comportamentos físicos e a análise numérica computacional torna-se cada vez mais possível e precisa da determinação dos padrões de escoamento dentro tudo tubo. A partir das equações e dos mapas de arranjo é possível modelar o problema e fazer a implementação matemática e simulação dos padrões de escoamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da modelagem foi definido um intervalo de velocidade superficiais para o líquido e para o gás de 0,5m/s até 1,5m/s, com um incremento de 0,25m/s. Do mesmo modo, com a intenção de notar o efeito do diâmetro do tubo no padrão de escoamento. Para isso foram utilizados quatro tamanhos de diâmetro d e geradas quatro tabelas.

Tabela 1 – Padrão de escoamento com tubo capilar de diâmetro $d=0,3\text{mm}$ de acordo com as velocidades superficiais das fases.

Tabela 1 $d=0,3\text{mm}$					
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
0,50	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR
0,75	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR
1,00	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR
1,25	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2 – Padrão de escoamento com tubo capilar de diâmetro $d=1,0\text{mm}$ de acordo com as velocidades superficiais das fases.

Tabela 2 $d=1,0\text{mm}$					
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
0,50	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR
0,75	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR
1,00	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR
1,25	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 – Padrão de escoamento com tubo capilar de diâmetro $d=10,0\text{mm}$ de acordo com as velocidades superficiais das fases.

Tabela 3 $d=10,0\text{mm}$					
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,00	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,25	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	BOLHAS	SEMIANULAR
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4 – Padrão de escoamento com tubo capilar de diâmetro $d=25,0\text{mm}$ de acordo com as velocidades superficiais das fases.

Tabela 4 $d=25\text{mm}$					
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,00	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS

1,25	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,50	BOLHAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS

Fonte: Autoria própria (2020).

Após a inserção dos dados de velocidade superficial o programa executa uma simulação para localizar o ponto no mapa conforme foi descrito anteriormente. Foi observado que a medida que se estrangula o fluido diminuindo o diâmetro do tubo a extrapolação do mapa se torna complicada. Como Stuckenbruck nos diz sobre o mapa de Taitel e Dukler (1976):

Os autores mostraram que esses parâmetros têm efeitos consideráveis sobre os resultados. [...] coordenadas universais para os mapas de regime de escoamento talvez nunca sejam conseguidas uma vez que, para cada transição, parâmetros relevantes tendem a ser distintos uns dos outros. (Stuckenbruck, 2020).

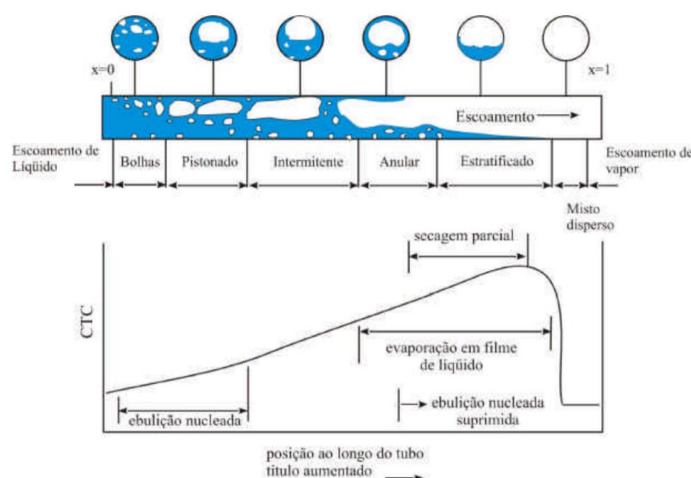
Contudo, ao utilizarmos o diâmetro $d=25,0\text{mm}$ obtivemos um resultado condizente com o mapa de Taitel e Dukler (1976), tornando a identificação do padrão possível.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Ainda que tenha sido possível identificar os padrões de comportamento, quando há a extrapolação do diâmetro para valores muito pequenos, como tubos capilares, o comportamento do mapa tende a migrar para a extremidade superior direita, diminuindo as demais áreas. Como já dito, o estado semianular é um estado de transição. Desse modo, a extrapolação leva ao mapa apresentar apenas a transição de bolhas para anular, mesmo que os outros padrões existam.

Contudo, a possibilidade de identificar padrões se torna muito útil quando se deseja investigar como as diferentes fases do fluido no tubo trocam calor com o meio externo. Nesse ponto, Bueno (2004) nos apresenta o esquema abaixo, possibilitando estudos futuros no tópico.

Figura 4 – Representação esquemática dos padrões de escoamento e dos Coeficientes de Transferência de Calor



Fonte: Bueno (2004, p. 27)

Pode-se notar que as fases do fluido influencia diretamente no Coeficiente de Transferência de Calor – CTC, alterando, desse modo, a eficiência de dispositivos trocadores de calor, bem como a temperatura externa desses. Esses fatores podem influenciar, também, na formação de camadas de gelo poroso em evaporadores de sistemas de refrigeração.

REFERÊNCIAS

ANICETO, P.H.S.: **Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para a Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11546@1> Acessado em: 28/08/2020.

BUENO, Sandhoerts Said. **Modelagem do escoamento ao longo de evaporadores de serpentina com tubos aletados**. 2004. 127 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/88893>. Acessado em: 01/09/2020.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. 2011. 147 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264105> . Acesso em: 28/08/2020.

Quibén, Jesús. **Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes**. PhD thesis, University Pierre ana Marie Curic, France and Spanish. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/37421723_Experimental_and_analytical_study_of_two-phase_pressure_drops_during_evaporation_in_horizontal_tubes Acessado em 28/08/2020.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

STUCKENBRUCK, Sidney. Padrões de Escoamento. **Introdução ao Escoamento Multifásico**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://multifasico.usuarios.rdc.puc-rio.br/CHP07.pdf>. Acessado em: 27/08/2020.