

Avaliação da estimativa de carga de refrigerante em evaporadores através de uso de diferentes modelos de fração de vazio – EVR2021-0024

Fernando N. Quintino ^{1,*}, Cristiano B. Tibiriçá ¹

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Heat Transfer Research Group, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 13566-590

* Fernando N. Quintino, fernandonquintino@usp.br

Resumo

O inventário de máquinas de refrigeração é um tópico importante, especialmente num momento que diversos refrigerantes estão sendo descontinuados devido ao elevado GWP e ODP, e seus efeitos no aquecimento global e camada de ozônio. Esse estudo avaliou o inventário de dois evaporadores para um refrigerador doméstico comum, com diâmetros de 1 e 8 mm e comprimento de 20 m, para os fluidos R134a, R404A, R600a e R717, usando discretização em volumes finitos e 10 correlações de fração de vazio mais o modelo homogêneo. Os resultados apontam que refrigerantes R134a e R404A tem inventário de três a quatro vezes maior que os de R600a e R717, que são fluidos naturais, além de serem atrativos ecologicamente e termicamente, podendo assim ser alternativas para o uso de refrigeração doméstica. Também foi constatado que o modelo adotado influi moderadamente no inventário, especialmente para o modelo homogêneo o valor é aproximadamente três vezes menor.

Palavras-chave: inventário, refrigeração, fração de vazio

Introdução

O uso da refrigeração por compressão de vapor é consolidado em diversas aplicações, como geladeiras, máquinas de ar condicionado, refrigeradores comerciais e trocadores industriais.

Um importante fator de projeto para uma máquina de refrigeração é a carga de refrigerante, denominada inventário. Apesar de sua importância, sua medição direta é complicada, envolvendo a remoção do fluido e consequente pesagem.

Apresentamos uma abordagem alternativa para determinação do inventário de um evaporador típico em aplicação doméstica. Ela consiste da integração de elementos do evaporador alongado, usando a fração de vazio para o cálculo de massa. Além disso, o título equivalente para o cálculo de massa foi determinado.

Metodologia

Para um evaporador de diâmetro D e comprimento l , um elemento diferencial de volume dV é definido como:

$$dV = \pi \frac{D^2}{4} dl \quad (1)$$

Assim, a massa m de um elemento diferencial do trocador é dada por:

$$dm = [\rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha] dV \quad (2)$$

onde ρ_l e ρ_g são as densidades das fases líquido e vapor e α é a fração de vazio.

A fração de vazio é um parâmetro desconhecido a priori, sendo estimado usando correlações semi-empíricas. Tais modelos são função do fluido refrigerante, do título de vapor x , do fluxo de massa G e da temperatura de saturação T_s .

Para esta modelagem, a perda de pressão foi desconsiderada. Desta forma, para um fluido e condições de operação determinadas, a massa passa a depender apenas da fração de vazio, que é função do título de vapor.

Uma forma de modelagem comum em trocadores consiste em tomar seu comprimento alongado e discretizá-lo. Assumindo que o título de vapor varia linearmente com o comprimento de tubo, têm-se:

$$m = \pi \frac{D^2}{4} \int_{l_i}^{l_f} [\rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha] dl \quad (3)$$

Uma fração de vazio equivalente é definida como:

$$m = V[\rho_l(1 - \bar{\alpha}) + \rho_g \bar{\alpha}]$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\rho_l - m/V}{\rho_l - \rho_g} \quad (4)$$

Com condições de operação definidas, é possível obter um título equivalente $\bar{x}$, que é associado a $\bar{\alpha}$. Caso o evaporador operasse em todo o comprimento com $\bar{x}$, a massa obtida seria a mesma da calculada pela integração.

A discretização foi feita dividindo o evaporador em 1000 elementos. Foram considerados os fluidos R134a, R404A, R600a e R717. A Tab. 1 apresenta os parâmetros adotados:

Tabela 1: Parâmetros da simulação

Parâmetro	Valor
l	20 m
D	1 – 8 mm
T_s	–15 – 5 °C
G	50 – 200 kg/(m ² s)
x	[0,1]

Os evaporadores tinham 1 mm e 8 mm. O evaporador modelado considerando 100 tubos paralelos com comprimento de 20 mm.

Para o cálculo da fração de vazio foram utilizadas 10 correlações mais o modelo homogêneo.

Resultados

As Tab. 2 a 5 apresentam o inventário, fração de vazio e título de vapor equivalentes, estratificados por modelo de fração de vazio, para o tubo de 8 mm de diâmetro e $G = 200 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Nota-se que não foi considerado o efeito da perda de pressão e nem de curvas de retorno, sendo assim apenas uma primeira aproximação.

Tabela 2: Resultados para o R134a

Correlação	$m \text{ [kg]}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	4,89	0,97	0,16
Lockhart & Martinelli (1942)	9,23	0,94	0,27
Zivi (1964)	18,71	0,87	0,36
Premoli et al. (1970)	13,20	0,91	0,25
Rouhani & Axelsson (1970)	14,19	0,90	0,31
Steiner (1993)	18,43	0,87	0,19
Woldesemayat & Ghajar (2007)	13,61	0,90	0,32
Cioncolini & Thome (2012)	12,95	0,91	0,28
Kanizawa & Ribatski (2015)	10,64	0,93	0,31
Tibiriçá et al. (2017)	13,51	0,91	0,30
Gardenghi et al. (2020)	11,51	0,92	0,27
Média	12,67	0,91	0,27

Tabela 3: Resultados para o R404A

Correlação	$m \text{ [kg]}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	8,53	0,94	0,21
Lockhart & Martinelli (1942)	11,78	0,92	0,29
Zivi (1964)	23,80	0,82	0,35
Premoli et al. (1970)	17,98	0,86	0,28
Rouhani & Axelsson (1970)	17,68	0,87	0,32
Steiner (1993)	21,07	0,84	0,23
Woldesemayat & Ghajar (2007)	16,81	0,87	0,31
Cioncolini & Thome (2012)	16,93	0,87	0,30
Kanizawa & Ribatski (2015)	13,54	0,90	0,32
Tibiriçá et al. (2017)	17,62	0,87	0,32
Gardenghi et al. (2020)	16,64	0,88	0,31
Média	16,51	0,88	0,29

A Fig. 1 apresenta a distribuição de massa para o evaporador de 20 m. Apenas o fluido R134a foi demonstrado por limitação de espaço.

O $\bar{x}$ não é igual a 0,5 em nenhum caso pois a massa depende de uma combinação de α com ρ_l e ρ_g . Como ρ_l é maior que ρ_g , $\bar{\alpha}$ é mais próximo de 1, conforme Eq. 2.

Tabela 4: Resultados para o R600a

Correlação	$m \text{ [kg]}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	1,66	0,98	0,15
Lockhart & Martinelli (1942)	3,58	0,94	0,27
Zivi (1964)	6,50	0,90	0,26
Premoli et al. (1970)	4,93	0,92	0,23
Rouhani & Axelsson (1970)	4,93	0,92	0,29
Steiner (1993)	7,34	0,88	0,16
Woldesemayat & Ghajar (2007)	5,19	0,92	0,35
Cioncolini & Thome (2012)	4,66	0,93	0,28
Kanizawa & Ribatski (2015)	4,16	0,93	0,31
Tibiriçá et al. (2017)	4,66	0,93	0,28
Gardenghi et al. (2020)	3,67	0,94	0,25
Média	4,59	0,93	0,26

Tabela 5: Resultados para o R717

Correlação	$m \text{ [kg]}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	1,44	0,98	0,13
Lockhart & Martinelli (1942)	3,61	0,95	0,26
Zivi (1964)	6,88	0,90	0,91
Premoli et al. (1970)	4,65	0,93	0,22
Rouhani & Axelsson (1970)	5,06	0,93	0,30
Steiner (1993)	7,74	0,89	0,15
Woldesemayat & Ghajar (2007)	5,37	0,92	0,36
Cioncolini & Thome (2012)	4,61	0,93	0,28
Kanizawa & Ribatski (2015)	4,11	0,94	0,31
Tibiriçá et al. (2017)	5,32	0,92	0,28
Gardenghi et al. (2020)	3,40	0,95	0,24
Média	4,65	0,93	0,31

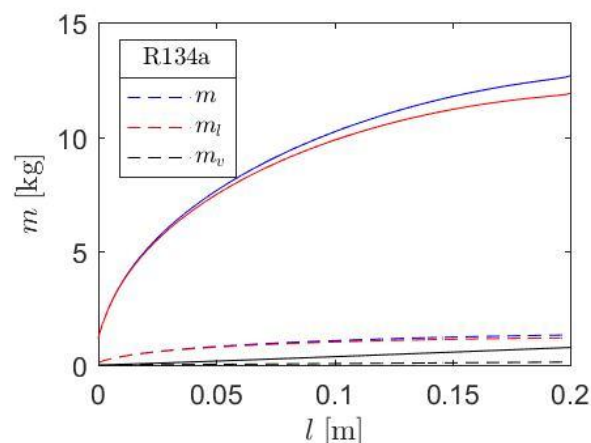


Figura 1: Distribuição de massa para o evaporador de 8 mm, $G = 200 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $T = 5^\circ\text{C}$ (dashed) e $T = -15^\circ\text{C}$ (solid)

As Tab. 6 a 9 apresentam o resultado para o evaporador com o diâmetro de diâmetro de 1 mm.

Tabela 6: Resultados para o R134a

Correlação	m [g]	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	76,43	0,97	0,16
Lockhart & Martinelli (1942)	144,16	0,94	0,27
Zivi (1964)	305,85	0,86	0,25
Premoli et al. (1970)	206,22	0,91	0,34
Rouhani & Axelsson (1970)	297,56	0,86	0,19
Steiner (1993)	288,01	0,87	0,32
Woldesemayat & Ghajar (2007)	212,73	0,90	0,28
Cioncolini & Thome (2012)	189,14	0,92	0,31
Kanizawa & Ribatski (2015)	166,28	0,93	0,29
Tibiriçá et al. (2017)	184,35	0,92	0,26
Gardenghi et al. (2020)	154,01	0,93	0,26
Média	200,0	0,91	0,27

Tabela 7: Resultados para o R404A

Correlação	m [g]	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	133,21	0,94	0,21
Lockhart & Martinelli (1942)	184,01	0,92	0,29
Zivi (1964)	385,28	0,81	0,28
Premoli et al. (1970)	280,96	0,86	0,35
Rouhani & Axelsson (1970)	346,71	0,83	0,23
Steiner (1993)	329,29	0,84	0,31
Woldesemayat & Ghajar (2007)	262,65	0,87	0,30
Cioncolini & Thome (2012)	245,94	0,88	0,32
Kanizawa & Ribatski (2015)	211,55	0,90	0,31
Tibiriçá et al. (2017)	243,64	0,88	0,29
Gardenghi et al. (2020)	226,02	0,89	0,28
Média	257,98	0,88	0,29

Tabela 8: Resultados para o R600a

Correlação	m [g]	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	25,88	0,98	0,15
Lockhart & Martinelli (1942)	55,92	0,94	0,27
Zivi (1964)	103,60	0,89	0,23
Premoli et al. (1970)	76,96	0,92	0,33
Rouhani & Axelsson (1970)	108,01	0,89	0,16
Steiner (1993)	114,61	0,88	0,35
Woldesemayat & Ghajar (2007)	81,06	0,92	0,28
Cioncolini & Thome (2012)	69,96	0,93	0,31
Kanizawa & Ribatski (2015)	64,94	0,93	0,27
Tibiriçá et al. (2017)	63,25	0,94	0,24
Gardenghi et al. (2020)	48,82	0,95	0,25
Média	72,65	0,93	0,26

Tabela 9: Resultados para o R717

Correlação	m [g]	$\bar{\alpha}$	$\bar{x}$
Homogêneo	22,48	0,98	0,13
Lockhart & Martinelli (1942)	56,45	0,95	0,26
Zivi (1964)	105,94	0,90	0,24
Premoli et al. (1970)	72,62	0,93	0,33
Rouhani & Axelsson (1970)	110,15	0,90	0,15
Steiner (1993)	120,92	0,89	0,36
Woldesemayat & Ghajar (2007)	83,89	0,92	0,28
Cioncolini & Thome (2012)	69,25	0,94	0,31
Kanizawa & Ribatski (2015)	64,24	0,94	0,27
Tibiriçá et al. (2017)	72,06	0,93	0,23
Gardenghi et al. (2020)	45,06	0,96	0,25
Média	73,36	0,93	0,25

A Fig. 2 apresenta a distribuição de massa para o evaporador de 1 mm de diâmetro.

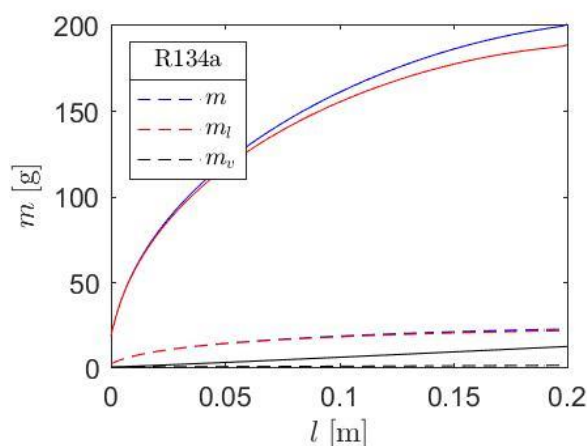


Figura 2: Distribuição de massa para o evaporador de 1 mm, $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 50\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ (dashed) e $G = 200\text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ (solid)

Conclusões

O R134a e R404A apresentaram inventário de três a quatro vezes maior que os de R600a e R717, embora não haja diferenças muito grandes tanto na fração de vazio quanto título de vapor equivalentes.

Ressalta-se que o R404A é uma mistura que contém R134a, o que explica parcialmente o maior inventário. O R600a e R717 não são quimicamente similares, embora sejam ambos compostos naturais.

Embora o R600a seja inflamável, seu uso pode ser justificado em refrigeração doméstica, onde o inventário é baixo.

O R717 é extremamente tóxico, pouco inflamável e corrói tubulações de cobre, não sendo muito utilizado em refrigeração doméstica. Seu uso é essencialmente restrito a refrigeração comercial e industrial, com protocolos rígidos de segurança. Li et al. (2019) faz um estudo comparativo para refrigeradores domésticos e aponta que o R717 tem diversas

vantagens termodinâmicas, além de ser consideravelmente mais barato que as opções usualmente consideradas. Os autores discutem as desvantagens já citadas, mas ressaltam que por a densidade da amônia ser menor que a do ar, em casos de vazamento o refrigerante seria dissipado, afetando pouco as pessoas no recinto. Também ressaltam que o refrigerante requer um compressor hermético, justamente para mitigar o problema da toxicidade.

Nota-se também que o modelo de fração de vazio escolhido tem influência moderada no inventário. O modelo homogêneo foi o mais discrepante, apresentando resultados duas ou três vezes menos massa. Os outros modelos não divergem muito, sendo que a correlação de Rouhani & Axelsson (1970), consistentemente apresentou inventários de 30 % a 100 % maiores.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001,

Referências

- Lockhart, R. W. & Martinelli, R. C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45(1), 39–48.
- Zivi, S. M. (1964). Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production. *Journal of Heat Transfer, ASME International*, 86(2), 247–251.
- Premoli, A., Francesco, D. & Prima, A. (1970). An empirical correlation for evaluating two-phase mixture density under adiabatic conditions. *European Two-Phase Flow Group Meeting*, Milan, Italy.
- Rouhani, S. & Axelsson, E. (1970). Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13(2), 383–393.
- Steiner, D. (1993). Heat transfer to boiling saturated liquids. *VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas)*. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV). Verein Deutscher Ingenieure.
- Woldesemayat, M. A. & Ghajar, A. J. (2007). Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(4), 347–370.
- Cioncolini, A. & Thome, J. R. (2012). Void fraction prediction in annular two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 43, 72–84.
- Kanizawa, F. T. & Ribatski, G. (2015). Void fraction predictive method based on the minimum kinetic energy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(1), 209–225.
- Tibiriça, C. B. et al. (2017). A complete set of simple and optimized correlations for microchannel flow boiling and two-phase flow applications. *Applied Thermal Engineering*, 126, 774–795.

- Li, Z. et al. (2019). Comparative study on energy efficiency of low GWP refrigerants in domestic refrigerators with capacity modulation. *Energy and Buildings*, 192(1), 93–100.
- Gardenghi, Á. R. et al. (2020). Overview of void fraction measurement techniques, databases and correlations for two-phase flow in small diameter channels. *Fluids*, 5(4), 1–26.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento,