

EQUAÇÕES EXPLÍCITAS APLICÁVEIS AO ESCOAMENTO DE HFC-134a ATRAVÉS DE TROCADORES DE CALOR TUBO CAPILAR-LINHA DE SUÇÃO

Cláudio Melo – melo@nrva.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica
Caixa Postal 476 – 88.040-900 – Florianópolis – SC

Jony M. Zangari – jzangari@hussmann.com.br

Hussann Fast Frio do Brasil Ltda

Avenida Esperanto 443

88067-050 – Londrina - Pr

***Resumo.** Este artigo relata parte das atividades realizadas dentro de um amplo trabalho experimental, visando caracterizar o escoamento de HFC-134a através de trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção do tipo concêntrico. Um aparato experimental, que permite variar a posição do trocador em relação ao capilar, foi especialmente desenvolvido. Na região de transferência de calor este aparato facilita a medição da temperatura do fluido na linha de sucção e da temperatura da superfície externa do capilar. Os ensaios foram planejados em base estatística. Foram consideradas como variáveis independentes o diâmetro e o comprimento do tubo capilar, o diâmetro da linha de sucção, o posicionamento e o comprimento do trocador de calor, a pressão de condensação e o grau de subresfriamento. Como variáveis dependentes obteve-se o fluxo de massa e os perfis de temperatura ao longo do capilar e da linha de sucção. Os resultados obtidos foram utilizados para gerar um conjunto de equações explícitas, capazes de prever o fluxo de massa e a temperatura do fluido na saída da linha de sucção.*

***Palavras-chave:** Refrigeração doméstica, Tubos capilares, Trocador de calor, Dispositivo de expansão*

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos trabalhos, envolvendo trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção refere-se ao tipo lateral. Para a geometria concêntrica, de uso bastante difundido no Brasil, apenas um pequeno número de informações experimentais encontra-se disponível. Desta forma, resolveu-se empreender um trabalho experimental com o objetivo de propor uma metodologia alternativa de dimensionamento para o componente em questão.

Todos os experimentos foram realizados com o HFC-134a, e cada ponto experimental envolvia a medição das seguintes variáveis: fluxo de massa, perfis de temperatura ao longo do

tubo capilar e da linha de sucção e pressões na entrada e saída do capilar e da linha de sucção.

Tendo em vista o grande número de variáveis que influenciam o escoamento, e a necessidade de planejar os teste experimentais, tornou-se necessário estabelecer os parâmetros de análise mais relevantes. Para tanto utilizou-se o programa CAPHEAT (Mezavilla,1995), e as informações experimentais obtidas com trocadores laterais (Mendonça, 1996, Pate, 1982, Bittle et. al., 1995). Tais parâmetros, em número de oito, são os seguintes: pressão na entrada do tubo capilar (P_e), grau de subresfriamento (Sub), temperatura na entrada do trocador de calor (T_{els}), diâmetro interno do tubo capilar (D), diâmetro interno da linha de sucção (D_s), comprimento do tubo capilar (L), comprimento do trocador de calor (L_{tc}) e comprimento de entrada adiabático (L_e).

Com o objetivo de reduzir o número de testes e analisar o efeito dos oito *parâmetros independentes* (pressão na entrada do tubo capilar, diâmetro interno do tubo capilar, grau de subresfriamento, etc.) sobre os *parâmetros dependentes* (fluxo de massa e temperatura na saída do trocador de calor), optou-se por planejar o experimento através de técnicas estatísticas.

2. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

O projeto fatorial (Box e Hunter, 1978, Das, 1979, Winer, 1971) foi a técnica escolhida para o planejamento dos testes. Este método consiste em selecionar os testes de forma que o efeito de vários parâmetros independentes, isolados ou combinados, sobre um ou mais parâmetros dependentes, possa ser avaliado. Na forma 2^k , onde k variáveis (8) são consideradas em apenas 2 níveis distintos, esta técnica exige um número mínimo de 256 testes.

A informação obtida do experimento fatorial é mais completa que aquela obtida a partir de uma série de experimentos de único fator, uma vez que o experimento fatorial permite a avaliação do efeito da *interação*. Por exemplo, muitas das propriedades da substância química H_2O não podem ser previstas estudando isoladamente as propriedades do oxigênio e do hidrogênio. A maioria das propriedades da água são atribuídas ao efeito da interação entre o oxigênio e o hidrogênio. O composto formado por esta interação tem propriedades as quais não são dadas pela simples adição das propriedades do oxigênio com as do hidrogênio.

2.1 Projeto fatorial fracionado

O número de 256 testes, apesar de relativamente baixo quando comparado com o número de testes que poderiam ser realizados caso os experimentos não fossem planejados a priori, é ainda elevado quando se considera principalmente o tempo necessário para alterar a configuração do trocador. Este fato levou a utilização de uma variação do projeto fatorial, denominado projeto fatorial fracionado (Box e Hunter, 1979, Das, 1979), que utiliza apenas uma fração do projeto fatorial completo. Com a utilização desta técnica, o número de testes é significativamente reduzido, mas a análise dos resultados torna-se mais complexa.

Os efeitos de cada um dos oito fatores considerados poderiam ser estimados, embora nem todos tivessem magnitudes significativas. Em termos de magnitude, pode-se dizer que efeitos principais tendem a ser maiores que interações entre dois fatores, as quais tendem a ser maiores que interações entre três fatores e assim sucessivamente (O efeito principal e as interações podem ser associadas com os termos de uma série de Taylor). Interações entre três ou mais fatores tendem a ser desprezíveis, e podem ser convenientemente descartadas (Ignorar interações entre três fatores corresponde a ignorar termos de terceira ordem na expansão de Taylor). Além disso, quando um número moderadamente grande de variáveis é introduzido em um projeto fatorial, alguns efeitos freqüentemente não podem ser distinguidos

dos demais. A impossibilidade de distinção de alguns efeitos e o fato das interações de alta ordem tenderem a ser desprezíveis, formam a base do projeto fatorial fracionado.

Para o estudo de trocadores de calor do tipo concêntrico, será utilizado um projeto fatorial fracionado, mais especificamente um 1/16 de um projeto fatorial 2^8 , o que é igual a $2^8/16 = 2^8/2^4 = 2^{(8-4)}$. Isto significa que serão estudados $k = 8$ fatores, onde $p = 4$ desses fatores são gerados de interações de um projeto fatorial $2^{(8-4)} = 2^4$ completo, utilizando interações entre três ou mais fatores. O número de teste necessários (16) fica, então, substancialmente reduzido mas como o projeto fatorial fracionado não proporciona resolução completa alguns efeitos de interações não vão poder ser claramente distinguidos. Deve-se ainda mencionar o projeto fatorial fracionado, exige que os experimentos sejam executados de acordo com um procedimento experimental padronizado e que se tenha uma experiência prévia com o fenômeno a ser estudado.

Com base nas informações sobre resolução de projeto, efeitos distintos e com base no tempo necessário para a troca da geometria do trocador de calor, chegou-se aos 16 testes mostrados na Tabela 1 (StatSoft, 1994).

Pode-se observar que todas as variáveis foram testadas em apenas dois níveis (superior e inferior), e que durante os testes ocorreram pequenas variações nas características geométricas e operacionais do trocador de calor. As duas últimas colunas são os parâmetros dependentes e representam, portanto o resultado dos testes. Deve-se ressaltar que é essencial que os testes sejam realizados de forma aleatória, ou seja, não seguindo a seqüência apresentada na Tabela a seguir.

Tabela 1 . Testes experimentais

N° Teste	1 P _e [bar]	2 Sub [°C]	3 T _{els} [°C]	4 D [mm]	5 L [m]	6 D _s [mm]	7 L _{tc} [m]	8 L _e [m]	T _{sls} [°C]	$\dot{m}_{(exp)}$ [kg/h]
01	9,01	5,4	-17,0	0,61	3,000	6,30	1,000	0,200	15,9	2,51
02	14,03	5,4	-17,4	0,61	3,000	7,86	2,200	0,600	29,3	3,09
03	9,01	10,2	-16,9	0,61	3,963	6,30	2,200	0,600	19,8	2,02
04	14,01	10,1	-17,0	0,61	3,963	7,86	0,998	0,195	19,4	2,52
05	9,04	5,5	-10,9	0,61	3,963	7,86	2,200	0,200	23,4	1,91
06	14,04	5,4	-11,1	0,61	3,963	6,30	1,000	0,600	24,1	2,42
07	9,01	10,5	-11,0	0,61	3,000	7,86	0,998	0,603	11,8	2,36
08	14,03	10,2	-10,8	0,61	3,000	6,30	2,200	0,200	32,2	3,31
09	9,02	4,9	-17,1	0,83	3,963	7,86	0,998	0,604	7,1	4,67
10	14,00	5,2	-17,0	0,83	3,963	6,30	2,200	0,200	30,1	7,35
11	9,01	10,3	-16,8	0,83	3,000	7,86	2,200	0,202	13,5	6,08
12	14,01	10,0	-17,0	0,83	3,000	6,30	1,000	0,601	13,1	7,86
13	9,03	5,0	-11,1	0,83	3,000	6,30	2,200	0,600	20,0	6,35
14	14,03	5,0	-11,2	0,83	3,000	7,86	0,998	0,201	15,2	7,42
15	9,02	9,9	-11,1	0,83	3,963	6,30	1,000	0,200	9,4	5,29
16	14,01	10,0	-10,9	0,83	3,963	7,86	2,200	0,602	23,4	6,78

A utilização de um projeto fatorial em apenas dois níveis significa que uma variação do nível superior para o inferior de qualquer parâmetro independente implica numa variação linear no parâmetro dependente. No presente caso esta não é uma restrição importante pois, nos níveis adotados na Tabela 1, os parâmetros dependentes (fluxo de massa e temperatura na saída da linha de sucção) variam quase que linearmente com todos os parâmetros dependentes (Zangari, 1998) (Zangari et. al.,1999).

3. CORRELAÇÕES EMPÍRICAS

O planejamento estatístico empregado possibilita a obtenção de correlações empíricas envolvendo as diversas variáveis estudadas. Para tanto torna-se necessário conhecer os fatores principais e as combinações entre os fatores com influência sobre o escoamento.

Para obter as correlações empíricas, tornou-se necessário calcular os efeitos principais e os efeitos combinados entre dois fatores. Estes cálculos foram realizados utilizando-se a metodologia proposta por Box e Hunter (1979) e são mostrados detalhadamente por Zangari (1998). Os efeitos principais representam o efeito de cada fator sobre o fluxo de massa ou sobre a temperatura na saída da linha de sucção, quando passa-se do nível inferior para o nível superior.

Como era de se esperar, o diâmetro interno do tubo capilar é o fator preponderante sobre o fluxo de massa, seguido pela pressão na entrada e pelo comprimento do tubo capilar. Para a temperatura na saída da linha de sucção, os fatores preponderantes são o comprimento do trocador de calor, a pressão na entrada do tubo capilar e o diâmetro interno do tubo capilar.. Para os efeitos combinados, verificou-se que todos os que eram significativos possuíam a mesma ordem de grandeza.

As Fig. 1 e 2 mostram respectivamente a influência dos efeitos principais e combinados sobre o fluxo de massa (\dot{m}) e sobre a temperatura na saída da linha de sucção (T_{sls}).

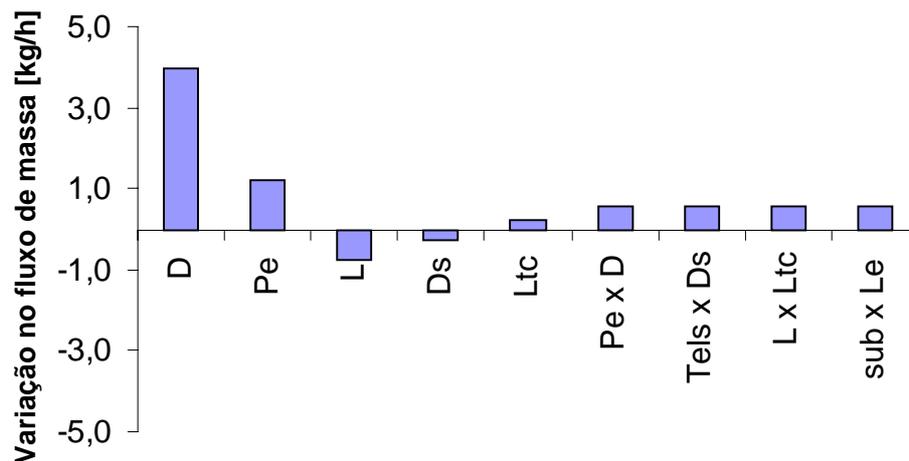


Figura 1 – Influência dos efeitos principais e combinados sobre o fluxo de massa.

Correlacionando os parâmetros mostrados nas Fig. 1 e 2 e utilizando o programa Statistica (Statsoft, 1993), juntamente com os valores indicados na Tabela 1, obtém-se as seguintes equações

$$\begin{aligned} \dot{m} = & 4,49638 + 0,24037(P_e - 11,52) + 17,96233(D - 0,72) - 0,78361(L - 3,481) \\ & + 1,03529(P_e - 11,52)(D - 0,72) + 0,02534(T_{els} + 14,0)(D_s - 7,08) + \\ & 0,22688(L - 3,481)(L_{tc} - 1,599) - 0,26052(Sub - 7,7)(L_e - 0,400) \end{aligned} \quad (1)$$

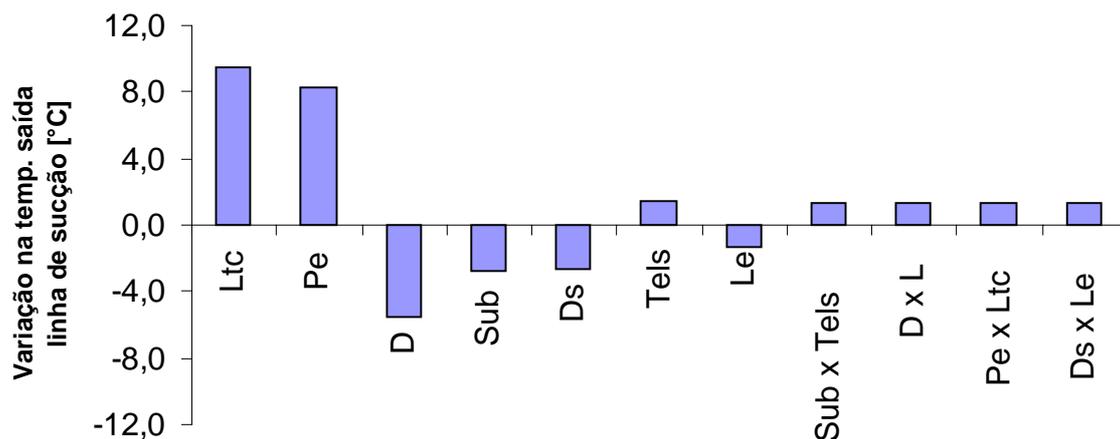


Figura 2 – Influência dos efeitos principais e combinados sobre a Temperatura na saída da linha de sucção.

$$\begin{aligned}
 T_{sls} = & 19,2695 + 1,6035(P_e - 11,52) - 0,5717(Sub - 7,7) + 0,2422(T_{els} + 14,0) \\
 & - 27,0152(D - 0,72) - 1,5173(D_s - 7,08) + 7,7239(L_{tc} - 1,599) - 4,0960(L_e - 0,400) \\
 & - 0,0434(Sub - 7,7)(T_{els} + 14,0) - 2,9745(D - 0,72)(L - 3,481) \\
 & + 0,6494(P_e - 11,52)(L_{tc} - 1,599) + 1,3918(D_s - 7,08)(L_e - 0,400)
 \end{aligned} \quad (2)$$

Deve-se ressaltar que as constantes entre parênteses são os valores médios das variáveis mostradas na Tabela 1.

As Fig. 3 e 4 mostram a diferença entre os fluxos de massa preditos pela Eq. (1) e os resultados mostrados na Tabela 1, respectivamente em termos percentuais e absolutos.

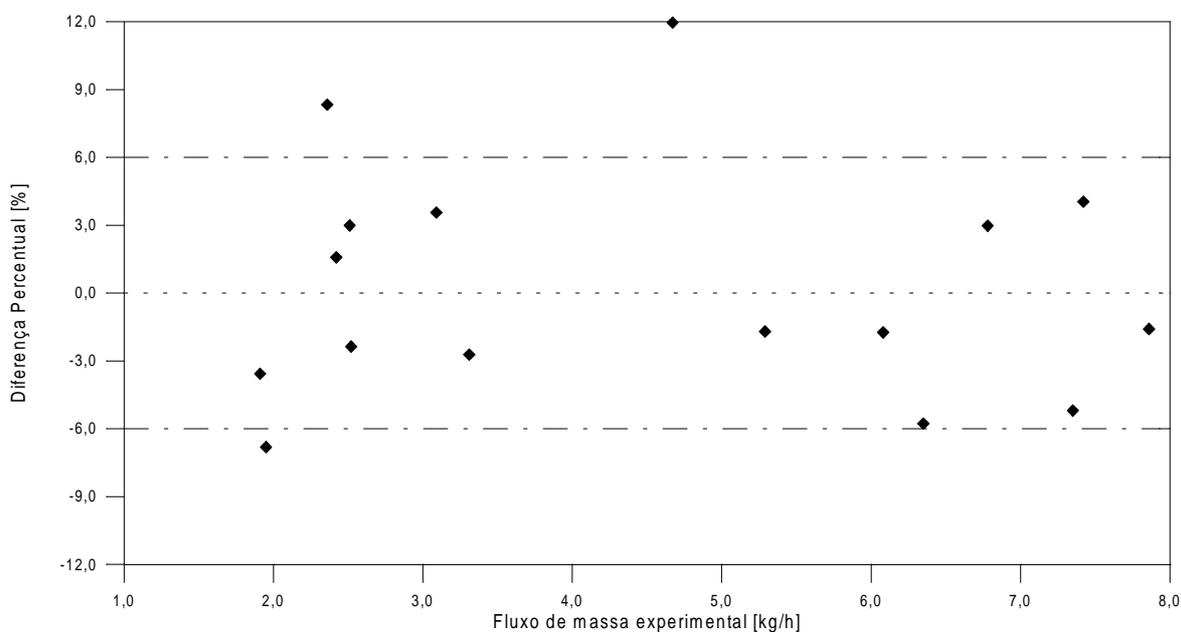


Figura 3 – Fluxo de massa experimental x Eq. (1) em termos percentuais.

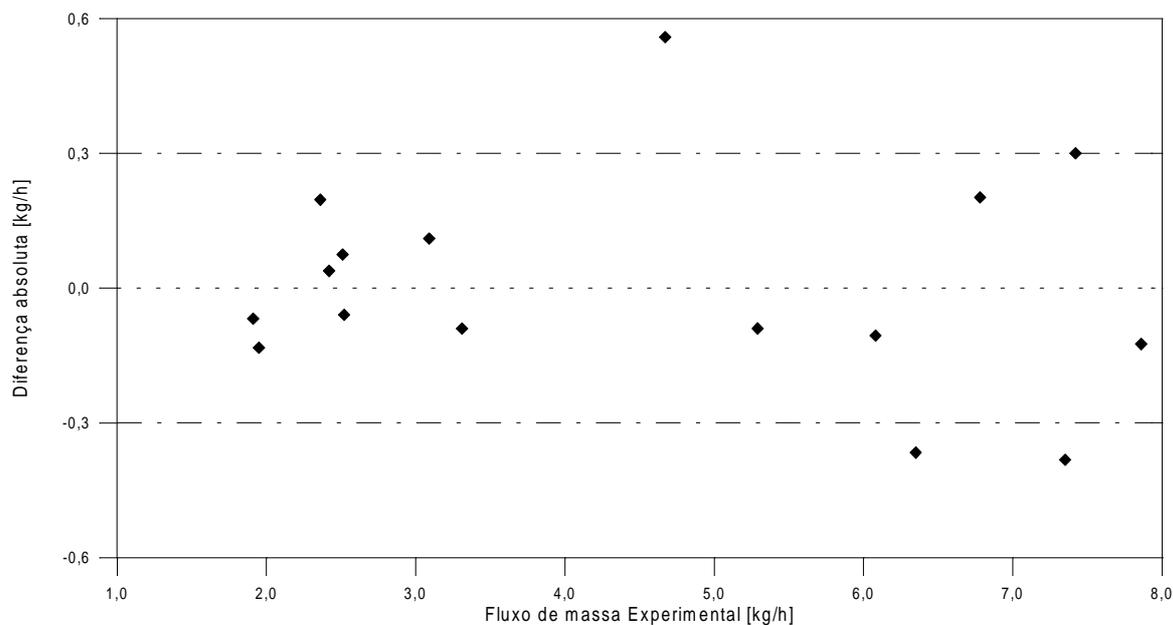


Figura 4 – Fluxo de massa experimental x Eq. (1) em termos absolutos.

Verifica-se que para 15 dos 16 testes mostrados na Tabela 1, a diferença percentual entre o valor do fluxo de massa experimental e o obtido através da Eq. (1) ficou na faixa de $\pm 10\%$. Em termos absolutos, esta diferença ficou em torno de $\pm 0,3$ kg/h.

A Fig. 5 ilustra a diferença entre o valor experimental da temperatura na saída da linha de sucção e o predito pela Eq. (2).

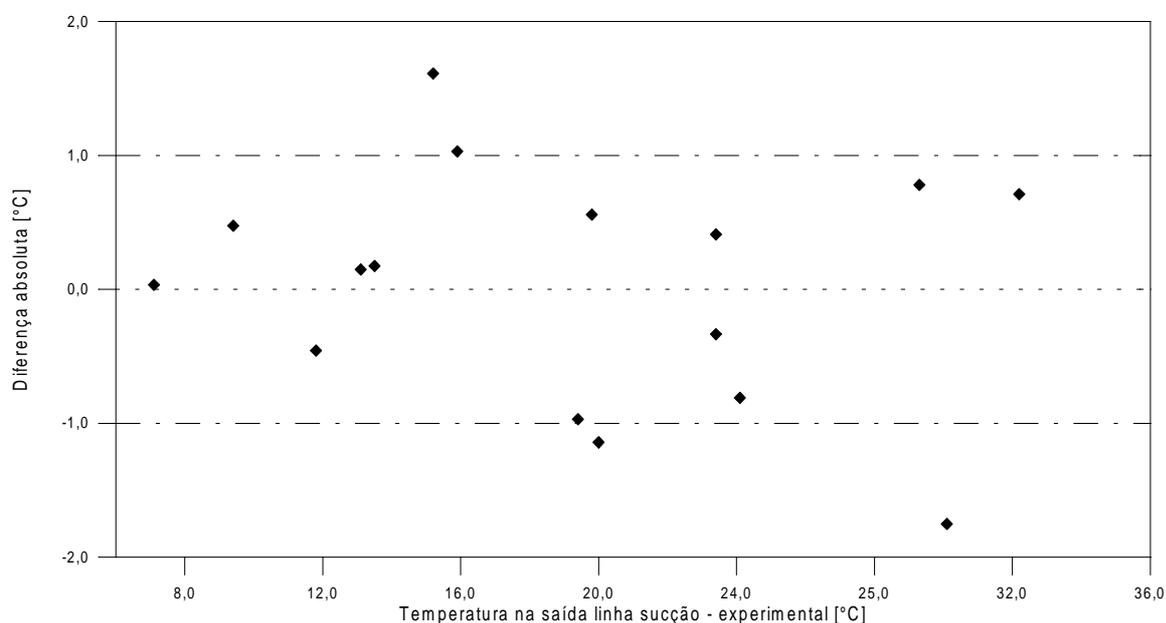


Figura 5 – Temperatura na saída da linha de sucção experimental x Eq. (2)

Pode-se observar que para a maioria dos 16 pontos mostrados na Tabela 1, a diferença encontrada para a temperatura na saída da linha de sucção ficou em torno de $\pm 1^\circ\text{C}$.

As Eq. (1) e (2) foram também comparadas com a base de dados obtida por Zangari (1998), num total de 265 pontos experimentais. Estas comparações são mostradas nas Fig. 6 a 8.

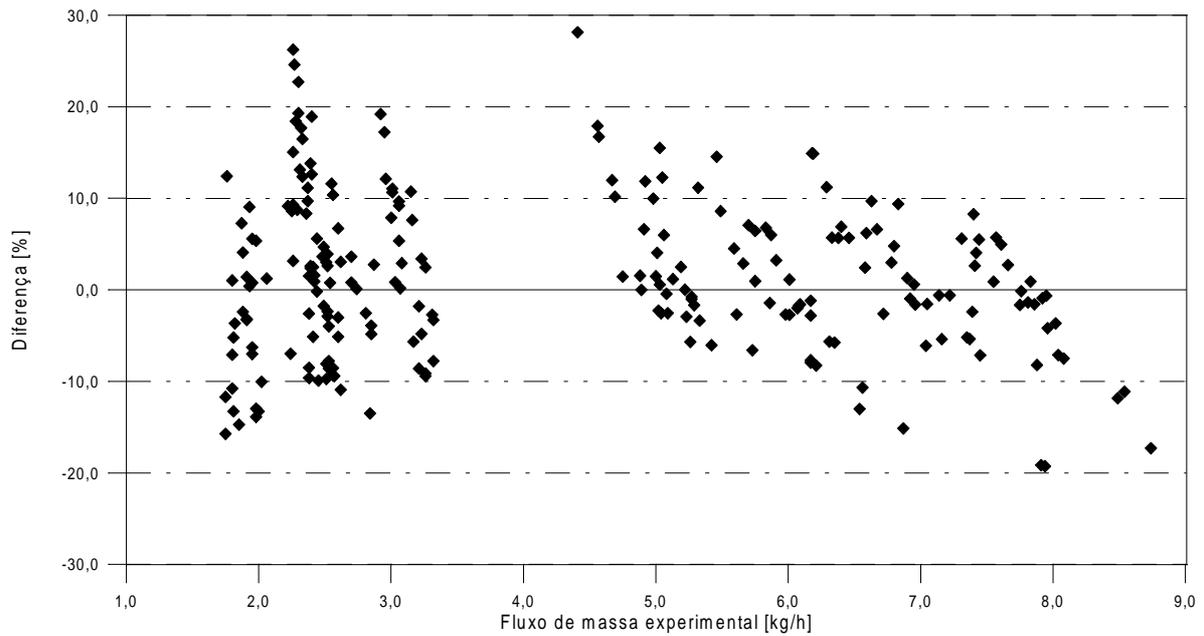


Figura 6 – Temperatura na saída da linha de sucção experimental x Eq. (1) em termos absolutos.

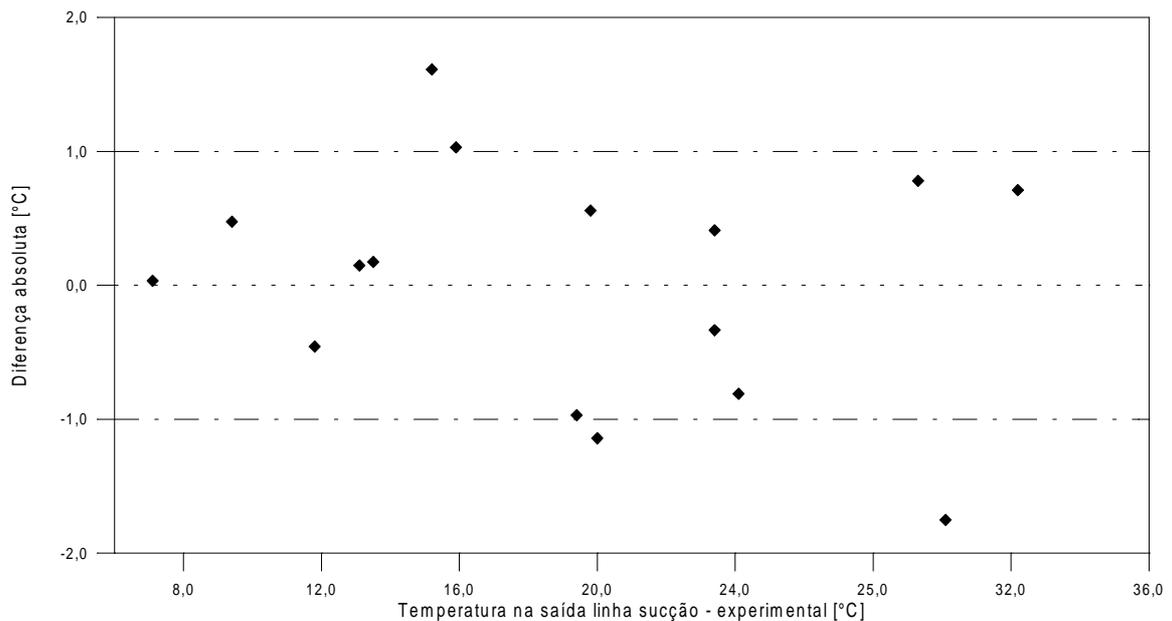


Figura 7 – Temperatura na saída da linha de sucção experimental x Eq. (1) em termos absolutos.

Verifica-se que para o fluxo de massa, 213 pontos experimentais mantiveram-se numa faixa de $\pm 10\%$, 49 mantiveram-se entre ± 10 e $\pm 20\%$ e apenas 4 pontos numa faixa superior a $\pm 20\%$. Cabe ressaltar que alguns dos testes experimentais se encontravam fora da faixa de operação prevista pelo projeto fatorial e que isso não afetou substancialmente as comparações realizadas. Este fato revela uma certa capacidade de “extrapolação” das Eq. (1) e (2).

A comparação realizada com a temperatura na saída da linha de sucção, revela que 228 pontos experimentais apresentaram uma diferença de $\pm 2^\circ\text{C}$, 38 pontos experimentais uma diferença entre ± 2 e $\pm 4^\circ\text{C}$ e apenas 5 pontos se situaram numa faixa superior a 4°C .

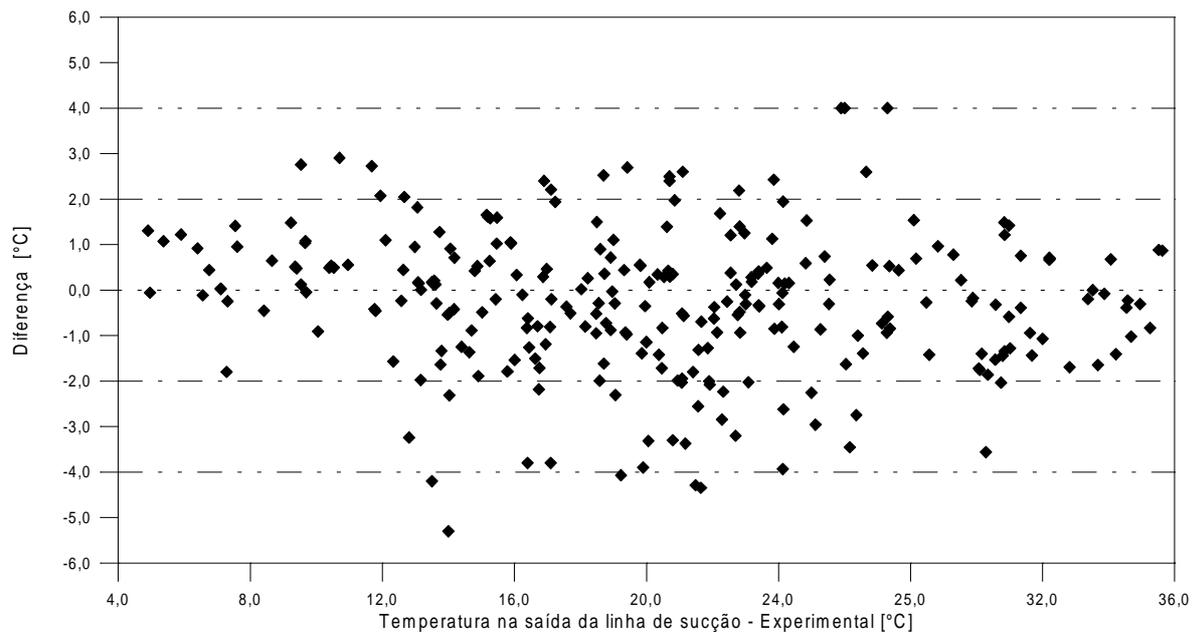


Figura 8 – Temperatura na saída da linha de sucção experimental x Eq. (2)

4. CONCLUSÕES

Um amplo trabalho experimental com HFC-134a e com trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção do tipo concêntrico foi realizado. Os testes foram planejados estatisticamente com o intuito de reduzir a matriz de teste sem afetar a qualidade dos resultados.

Dois equações explícitas, uma para o fluxo de massa e outra para a temperatura na saída da linha de sucção, foram desenvolvidas. Estas equações foram comparadas com um extenso banco de dados experimental quando se constatou um razoável nível de concordância.

As equações são de fácil utilização, reduzindo assim a necessidade de utilização de diagramas de selecionamento ou de programas de simulação.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido dentro de um programa de cooperação técnico científico entre a Embraco S.A. e o Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. O apoio recebido da Embraco S.A e do CNPq foram fundamentais para a realização deste trabalho, razão pela qual externamos os nossos agradecimentos, em especial ao Eng. Roberto Horn Pereira e ao Técnico Márcio Thiessen.

REFERÊNCIAS

- Bittle, R. R., Stephenson, W. R. & Pate, M. B., 1995, An experimental evaluation of capillary tube-suction line heat exchanger performance with R-152a, ASHRAE Transactions, Vol. 100, part 1, pp. 124-135.
- Box, G. E. P.; Hunter, W. G., 1978, Statistics for experimenters – An introduction to design, data analysis and model building, John Wiley and Sons, New York.
- Das, M. N., 1979, Design and analysis of experiments, John Wiley and Sons, New York
- Mendonça, K. C., 1996, Análise experimental de trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção do tipo lateral, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC.

- Mezavila, M. M., 1995, Simulação do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos capilares não-adiabáticos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC.
- Pate, M. B., 1982, A theoretical and experimental analysis of capillary tube-suction line heat exchangers, Ph. D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, USA.
- Statsoft, 1993, Statistica for Windows, Release 4.0.
- Zangari, J. M., 1998, Avaliação experimental do desempenho de trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção do tipo concêntrico, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC.
- Zangari, J. M., Melo, C. Ferreira, R. T. S., Efeito da geometria e das condições de operação sobre o desempenho de trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção do tipo concêntrico, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22-26 Novembro, Águas de Lindóia, SP.
- Winer, E. J., 1971, Statistical Principles in Experimental Design, McGraw-Hill, New York,

EXPLICIT EQUATIONS FOR THE HFC-134a FLOW THROUGH NON-ADIABATIC CAPILLARY TUBES

Abstract. *This work reports the results of an experimental study on concentric capillary tube-suction line heat exchangers commonly used as expansion devices in household refrigerators and freezers. Heat exchanger performance (mass flow rate and temperature at the outlet of the suction line) with the hydrocarbon R-134a was experimentally evaluated for a range of heat exchanger assemblies (internal diameter and length of the capillary tube, length and relative position of the heat exchanger) and operating conditions (condensing pressure and subcooling). The tests were planned and performed following a statistical based methodology. Based on the resulting database a set of explicit equations to predict the refrigerant mass flow rate and the suction line outlet temperature was developed. The equations were compared with a large set of experimental data and a reasonable agreement was achieved. It is therefore anticipated that the equations will become a powerful tool for designers modeling refrigeration systems.*

Keywords: *Household refrigerator, Capillary tube, Heat exchanger, Expansion device*