



**Paul Ortega Sotomayor**

**Modelagem de Evaporadores Tipo Placas para  
Sistemas Condicionadores de Ar Automotivos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Alberto dos Reis Parise  
Co-orientadores: Dr. Frank Chaviano Pruzaesky  
Dr. Samuel F.Yana Motta

Rio de Janeiro  
Abril de 2008



**Paul Ortega Sotomayor**

## **Modelagem de Evaporadores Tipo Placas para Sistemas Condicionadores de Ar Automotivos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Frank Chaviano Pruzaesky**

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Sergio Leal Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. João Manoel Dias Pimenta**

Universidade de Brasília

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 8 de abril de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Paul Ortega Sotomayor**

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Depto. de Engenharia Mecânica da UNSAAC ( Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco), em 2005. Atualmente tem continuado com a linha de pesquisa na área de Termociências, com o estudo de simulação de sistemas e componentes de refrigeração e condicionamento de ar.

#### Ficha Catalográfica

Sotomayor, Paul Ortega

Modelagem de evaporadores tipo placas para sistemas condicionadores de ar automotivos / Paul Ortega Sotomayor ; orientador: José Alberto dos Reis Parise ; co-orientadores: Frank Chaviano Pruzaesky, Samuel F. Yana Motta. – 2008.

139 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Refrigeração. 3. Simulação. 4. Bifásico. 5. Evaporador. 6. Automotivo. 7. Placas. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pruzaesky, Frank Chaviano. III. Motta, Samuel F. Yana. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

O pensamento é a grandeza do homem

Pascal

## Agradecimentos

A José Alberto do Reis Parise, meu orientador, primeiramente pela amizade e a paciência em transmitir muito do seu valioso conhecimento, por sempre ter me dado oportunidades e espaço para o meu crescimento, e por nunca ter deixado de exigir o melhor de mim.

Aos meus co-orientadores Samuel F. Yana Motta (Honeywell) e Frank Chaviano Pruzaesky (PUC-Rio) e a Elizabet Vera Becerra (Honeywell), pela amizade e cujas sugestões foram de enorme importância ao desenvolvimento do presente trabalho.

À HONEYWELL INC., EUA, pelo apoio e confiança fornecidos à pesquisa realizada.

À minha família, Mãe, Tia, Irmão; pelo apoio incondicional nas mais difíceis situações e decisões, e por constituírem sempre o mais importante de minha vida.

A Marlene, que sempre esteve do meu lado com esse brilho especial que a faz ser a pessoa cativante que me conquistou.

Ao Presvitero e Joana, com os quais sempre compartilhei meus sucessos e fracassos, e que tornaram esta caminhada mais leve e tranqüila, proporcionando inúmeros momentos de alegria.

A meus amigos Luis, Epifanio, David, Luis Enrique, Elder, Hugo, Mijail, pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

## Resumo

Sotomayor, Paul Ortega; Parise, José Alberto dos Reis; Pruzaesky, Frank Chaviano; Motta, Samuel F. Yana. **Modelagem de Evaporadores Tipo Placas para Sistemas Condicionadores de Ar Automotivos**. Rio de Janeiro, 2008. 139p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É desenvolvido um modelo de simulação de evaporadores automotivos tipo placa (Brazed Laminated Plate), para o resfriamento de ar úmido. O modelo estudado adota o método de análise local, onde o trocador de calor é dividido em um número de elementos de troca de calor, para os quais as equações de troca de calor e de conservação de energia são aplicadas. Para efeito da determinação do coeficiente local de troca de calor e do fator de atrito, o modelo considera duas regiões na troca de calor. Pelo lado do refrigerante foi considerada uma região bifásica (líquido - vapor) e outra, de superaquecimento (vapor). No lado do ar têm-se duas condições: com a superfície do evaporador seca ou molhada. Para cada zona foram levados em conta diferentes mecanismos de transferência de calor. Também foi estudada a queda de pressão do lado do refrigerante e do lado do ar, utilizando, para tal, as respectivas correlações de queda de pressão. Para a simulação foram consideradas definidas as condições de entrada dos fluidos e a geometria do evaporador. Um programa foi desenvolvido em FORTRAN para calcular os estados termodinâmicos de saída dos dois fluidos. As propriedades do refrigerante foram calculadas utilizando o software REFPROP versão 7.0, desenvolvido no NIST, EUA, o que permitiu a modelagem do trocador de calor operando com uma vasta gama de refrigerantes. Novos refrigerantes, H e 1234yf, ainda não constantes da biblioteca REFPROP v07, foram também testados. Os resultados da simulação foram comparados com dados experimentais disponíveis.

## Palavras-chave

Refrigeração, simulação, bifásico, evaporador, automotivo, placas.

## Abstract

Sotomayor, Paul Ortega; Parise, José Alberto dos Reis; Pruzaesky, Frank Chaviano; Motta, Samuel F. Yana. **Modeling of Evaporators Type Laminated Plate for Automotive Air Conditioning Systems**. Rio de Janeiro, 2008. 139p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A simulation model for automotive brazed laminate plate evaporators, for humid air cooling, was developed. The model adopts the local analysis method, where the heat exchanger is divided into a number of elemental control volumes, for which the equations of heat transfer and conservation of energy are applied. In order to determine the local heat transfer coefficient and friction factor, the model considers different regions in the heat exchanger. In the refrigerant side, two-phase or superheated flows were considered. In the air side, dry or wet surface conditions were modeled. For each zone different mechanisms of heat transfer and pressure drop were taken in account. The simulation model assumed prescribed evaporator geometry and inlet conditions for both fluids. A computer program was developed in FORTRAN to calculate overall thermodynamic outlet states of both fluids. Refrigerant properties were calculated using the software REFPROP version 7.0, developed by the NIST, U.S.A.. It allowed the modeling of the evaporator, operating with a vast range of refrigerants. New refrigerants, fluids H and 1234yf, (still not available in REFPROP v07 libraries) also were tested. The results of the simulation were compared with available experimental data.

## Keywords

Refrigeration, simulation, two phase, evaporator, automotive, plates.

# Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução  |    |
| 1.1. Objetivo  | 26 |
| 1.2. Descrição do Evaporador Automotivo tipo Placas                            | 26 |
| 1.3. Revisão Bibliográfica   | 31 |
| 1.4. Conteúdo do Trabalho  | 33 |
| 2. Análise do Volume de Controle   |    |
| 2.1. Introdução  | 35 |
| 2.2. Considerações Gerais  | 35 |
| 2.3. Tipos de Escoamentos  | 36 |
| 2.4. Definição do Volume de Controle   | 38 |
| 2.5. Análise do Elemento   | 39 |
| 2.5.1. Balanço de Energia para Condições de Superfície Seca do lado do Ar      | 40 |
| 2.5.2. Balanço de Energia para Condições de Superfície Molhada do lado do Ar   | 42 |
| 2.5.2. Geometria do Elemento   | 43 |
| 3. Coeficiente Locais de Transferência de Calor e Queda de Pressão dos Fluidos |    |
| 3.1. Introdução  | 49 |
| 3.2. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor do lado do Refrigerante  | 49 |
| 3.2.1. Região Bifásica   | 49 |
| 3.2.1.1. Correlação de Cooper (1984b)  | 53 |
| 3.2.1.2. Correlação de Han et al. (2003)                                       | 53 |
| 3.2.2. Região de Superaquecimento  | 54 |
| 3.3. Queda de Pressão do Refrigerante  | 55 |
| 3.3.1. Correlação de Han et al. (2003)   | 55 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 3.3.2      | Correlação de Yan e Lin (1999)  | 57  |
| 3.4.       | Coeficiente de Transferência de Calor do lado do Ar                         | 57  |
| 3.5.       | Queda de Pressão no lado do ar  | 60  |
| 4.         | Método de solução   |     |
| 4.1.       | Introdução  | 61  |
| 4.2.       | Procedimento de Solução   | 62  |
| 4.2.1.     | Solução do Caso A   | 67  |
| 4.2.2.     | Solução do Caso B   | 68  |
| 4.3.       | Algoritmo para a Solução do Evaporador                                      | 69  |
| 4.4.       | Crítério de Convergência  | 73  |
| 4.5.       | O Programa  | 74  |
| 5.         | Resultados  |     |
| 5.1.       | Introdução  | 79  |
| 5.2.       | Validação do Modelo.  | 79  |
| 5.2.1.     | Dados Experimentais para o R134a.   | 80  |
| 5.2.2.     | Comparação com Dados Experimentais.   | 84  |
| 5.2.2.1.   | Simulação Numérica do Evaporador Número 1.                                  | 85  |
| 5.2.2.1.1. | Resultados da Simulação do Evaporador<br>Número 1 com o Refrigerante R134a. | 86  |
| 5.2.2.1.2. | Resultados da Simulação do Evaporador<br>Número 1 com o Fluido H.           | 92  |
| 5.2.2.2    | Simulação Numérica do Evaporador Número 2                                   | 98  |
| 5.2.2.2.1  | Resultados da Simulação do Evaporador<br>número 2 com o Refrigerante R134a  | 99  |
| 5.2.2.2.2. | Resultados da Simulação do Evaporador<br>número 2 com o Fluido 1234yf       | 105 |
| 5.3.       | Conclusões  | 111 |
| 6.         | Conclusões e Sugestões  | 112 |
|            | Referências Bibliográficas  | 115 |
|            | Apêndice A  | 120 |
|            | Apêndice B  | 125 |

## Lista de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1.1 – Classificação dos fluidos refrigerantes.  | 25  |
| Tabela 1.2 – Substituição de fluidos refrigerantes (CETESB, 2001).   | 25  |
| Tabela 3.1 – Dados geométricos para aletas Multilouver, (Chang and Wang, 1997).                              | 58  |
| Tabela 5.1 – Dados gerais para o evaporador número 1.  | 80  |
| Tabela 5.2 – Dados gerais para o evaporador número 2.  | 80  |
| Tabela 5.3 – Condições de operação do refrigerante R134a no evaporador número 1 (HONEYWELL, 2007).           | 81  |
| Tabela 5.4 – Condições de operação do ar no evaporador número 1 (HONEYWELL, 2007).                           | 81  |
| Tabela 5.5 – Condições de operação do refrigerante R134a no evaporador número 2 (HONEYWELL, 2007).           | 82  |
| Tabela 5.6 – Condições de operação do ar no evaporador número 2 (HONEYWELL, 2007).                           | 83  |
| Tabela 5.7 – Combinações das correlações de transferência de calor e queda de pressão.                       | 84  |
| Tabela 5.8 – Dados de entrada do evaporador número 1.  | 85  |
| Tabela 5.9 – Erro médio das combinações, simulação do evaporador número 1 (R134a).                           | 92  |
| Tabela 5.10 – Erro médio das combinações de correlações na simulação do evaporador número 1 para o fluido H. | 98  |
| Tabela 5.11 – Condições de operação iniciais (refrigerante – ar) do evaporador número 2.                     | 98  |
| Tabela 5.12 – Erro médio das combinações na simulação do evaporador número 2 (R134a).                        | 105 |
| Tabela 5.13 – Erro médio das combinações na simulação do evaporador número 2 (1234yf).                       | 110 |

Tabela A.1 – Condições de iniciais de operação do evaporador. 120

Tabela A.2 – Variação da vazão mássica do refrigerante R134a  $\pm$  50 %. 121

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Sistema do ar condicionado automotivo (Hulsey, 2004)   | 27 |
| Figura 1.2 – Diagrama Pressão – Entalpia do ciclo real do sistema de refrigeração por compressão de vapor.  | 27 |
| Figura 1.3 – Figura 1.3 – (a) Vista de uma placa do evaporador e sua seção transversal com os canais. (b) Corte A'-A'   | 28 |
| Figuras 1.4 – Componentes do evaporador automotivo tipo placas (Brazed Laminated Plate –HONEYWELL INC. 2008).   | 29 |
| Figura 1.5 – Um tanque com um conjunto de placas do evaporador.   | 29 |
| Figura 1.6 – Vista frontal do evaporador tipo placa (Brazed Laminate Plate).  | 30 |
| Figura 1.7 – Vista superior e inferior do evaporador tipo placa (Brazed Laminate Plate).  | 30 |
| Figura 1.8 – Geometria da passagem interna do refrigerante no Distribuidor.   | 30 |
| Figura 2.1 – Processo de resfriamento e desumidificação do ar (McQuiston e Parker, 1988; ASHRAE, 2005).   | 36 |
| Figura 2.2 – Exemplo de configuração do evaporador tipo 5-6-9 (3 tanques com 5, 6 e 9 placas, respectivamente) e distribuição da entrada do refrigerante nos tanques. | 36 |
| Figura 2.3 – Configuração da placa dos tanques e possibilidade do escoamento do refrigerante.   | 37 |
| Figura 2.4 – Volume de controle (placa) e volume de controle elementar.   | 38 |
| Figura 2.5 – Número de divisões no passo do evaporador.   | 39 |
| Figura 2.6 – Condições de entrada e saída do refrigerante e do ar no elemento de controle. Esquema real do elemento de controle.                                      | 40 |
| Figura 2.7 – Ângulo de inclinação na direção do fluido.   | 44 |
| Figura 2.8 – Seção transversal do elemento e geometria de um canal.   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.9 – Seção transversal da aleta e placa.   | 46 |
| Figura 2.10 – Geometria das aletas tipo persiana (Multilouver),<br>(a) Vista superior (b) Vista frontal (c) Vista lateral<br>(W.Bullard,2006). | 47 |
| Figura 2.11 – Distribuição da aleta tipo Multipersiana (Multilouver)   | 47 |
| Figura 4.1 – Sistema de coordenadas para o análise do evaporador   | 65 |
| Figura 4.2 – Distribuição do fluxo de ar e do refrigerante no caso A.  | 68 |
| Figura 4.3 – Distribuição do fluxo de ar e do refrigerante no caso B.  | 69 |
| Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo de solução<br>(evaporador automotivo)   | 78 |
| Figura 5.1 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do<br>refrigerante R134a, com o evaporador 1.  | 86 |
| Figura 5.2 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do<br>refrigerante R134a, com o evaporador 1.  | 87 |
| Figura 5.3 – Erro em (°C) da temperatura de saída do<br>refrigerante R134a, com o evaporador 1.  | 88 |
| Figura 5.4 – Erro relativo em (%) da taxa de transferência de calor<br>do refrigerante R134a, com o evaporador 1.                              | 88 |
| Figura 5.5 – Erro relativo da queda de pressão do ar, para o<br>refrigerante R134a com o evaporador 1.   | 89 |
| Figura 5.6 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar, para o<br>Refrigerante R134a com o evaporador 1.                                      | 89 |
| Figura 5.7 – Erro da taxa total de transferência de calor do ar, para<br>o evaporador 1 operando com R134a.                                    | 90 |
| Figura 5.8 – Erro relativo na pressão na saída do refrigerante R134a<br>versus a vazão mássica experimental para o evaporador 1.               | 91 |
| Figura 5.9 – Erro relativo na queda da pressão do refrigerante R134a<br>versus vazão mássica experimental para o evaporador 1.                 | 91 |
| Figura 5.10 – Erro relativo da pressão de saída do refrigerante<br>(Fluido H) com o evaporador 1.  | 93 |
| Figura 5.11 – Erro relativo da queda de pressão do refrigerante<br>(Fluido H) com o evaporador 1.  | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.12 – Erro em (°C) da temperatura de saída do refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.                         | 94  |
| Figura 5.13 – Erro relativo da taxa de transferência de calor para o refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.          | 94  |
| Figura 5.14 – Erro relativo da queda de pressão do ar (Fluido H), com o evaporador 1.                                     | 95  |
| Figura 5.15 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (Fluido H), com o evaporador 1 .                                 | 95  |
| Figura 5.16 – Erro em (%) da taxa total de transferência de calor do ar (Fluido H), com o evaporador 1.                   | 96  |
| Figura 5.17 – Erro da pressão do refrigerante (Fluido H) na saída versus vazão mássica experimental, para o evaporador 1. | 97  |
| Figura 5.18 – Erro da queda da pressão do refrigerante (Fluido H) versus vazão mássica experimental, para o evaporador 1. | 97  |
| Figura 5.19 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do refrigerante (R134a), com o evaporador 2.                       | 100 |
| Figura 5.20 – Erro relativo da queda pressão do refrigerante R134a, com o evaporador 2.                                   | 101 |
| Figura 5.21 – Erro em (°C) da temperatura de saída do refrigerante R134a, com o evaporador 2.                             | 101 |
| Figura 5.22 – Erro relativo (%) da taxa de transferência de calor do refrigerante 134 <sup>a</sup> , com o evaporador 2.  | 102 |
| Figura 5.23 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do ar (R134a) com o evaporador 2.                                  | 102 |
| Figura 5.24 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (R134a) com o evaporador 2.                                      | 103 |
| Figura 5.25 – Erro em (%) da taxa total de transferência de calor do ar (R134a), com o evaporador 2                       | 103 |
| Figura 5.26 – Pressão do refrigerante (R134a) na saída versus vazão mássica experimental, com o evaporador 2.             | 104 |
| Figura 5.27 – Queda da pressão do refrigerante (R134a) versus vazão Mássica experimental, com o evaporador 2.             | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.28 – Erro relativo em (%) da pressão de saída do fluido (1234yf), com o evaporador 2.                     | 106 |
| Figura 5.29 – Erro relativo em (%) da queda pressão do fluido (1234yf), com o evaporador 2                         | 106 |
| Figura 5.30 – Erro em (°C) da temperatura de saída do fluido (1234yf), com o evaporador 2.                         | 107 |
| Figura 5.31 – Erro relativo em (%) da taxa de transferência de calor do refrigerante (1234yf), com o evaporador 2. | 107 |
| Figura 5.32 – Erro relativo em (%) da queda de pressão do ar (1234yf), com o evaporador 2.                         | 108 |
| Figura 5.33 – Erro em (°C) da temperatura de saída do ar (1234yf), com o evaporador 2.                             | 108 |
| Figura 5.34 – Erro da taxa total de transferência de calor do ar (1234yf), com o evaporador 2.                     | 109 |
| Figura 5.35 – Pressão do refrigerante (1234yf) na saída versus vazão mássica experimental, com o evaporador 2.     | 109 |
| Figura 5.36 – Queda da pressão do refrigerante (1234yf) versus vazão Mássica experimental, com o evaporador 2.     | 110 |
| Figura A.1 – Queda de Pressão vs. vazão mássica dos refrigerantes.   | 121 |
| Figura A.2 – Taxa de transferência de calor vs. vazão mássica dos refrigerantes.                                   | 122 |
| Figura A.3 – Temperatura de saída do ar vs. vazão mássica dos refrigerantes.                                       | 122 |
| Figura A.4 – Coeficiente de transferência de calor vs. qualidade dos refrigerantes.                                | 123 |
| Figura A.5 – Distribuição da temperatura do ar para o refrigerante R134a.  | 123 |
| Figura A.6 – Variação da queda de pressão dos refrigerantes vs. circuitagem do evaporador.                         | 124 |
| Figura B.1 – Comparação da pressão de saída numérica – experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 1.     | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura B.2 – Comparação da queda de pressão numérica – experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 1.                         | 126 |
| Figura B.3 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 1.                     | 126 |
| Figura B.4 – Comparação da taxa de transferência de calor numérica – experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 1.           | 127 |
| Figura B.5 – Comparação da queda de pressão numérica – experimental do ar, para o refrigerante R134a, com o evaporador 1.              | 127 |
| Figura B.6 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do ar, para o refrigerante R134a com o evaporador 1.           | 128 |
| Figura B.7 – Comparação da taxa total de transferência de calor numérica - experimental do ar, para o evaporador 1 operando com R134a. | 128 |
| Figura B.8 – Comparação da pressão de saída numérica – experimental do refrigerante (Fluido H) comparado com o evaporador 1.           | 129 |
| Figura B.9- Comparação da queda de pressão numérica – experimental do refrigerante (Fluido H), com o evaporador 1.                     | 129 |
| Figura B.10 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.                | 130 |
| Figura B.11 – Comparação da taxa de transferência de calor numérica - experimental para o refrigerante (Fluido H) com o evaporador 1.  | 130 |
| Figura B.12 – Comparação da queda de pressão numérica – experimental do ar (Fluido H), com o evaporador 1.                             | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura B.13 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do ar (Fluido H), com o evaporador 1.                 | 131 |
| Figura B.14 – Comparação da taxa total de transferência de calor numérica - experimental do ar (Fluido H), com o evaporador 1. | 132 |
| Figura B.15 – Comparação da pressão de saída numérica – experimental do refrigerante (R134a), com o evaporador 2.              | 132 |
| Figura B.16 – Comparação da queda pressão numérica – experimental do refrigerante R134a, com evaporador 2.                     | 133 |
| Figura B.17 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 2.            | 133 |
| Figura B.18 – Comparação da taxa de transferência de calor numérica - experimental do refrigerante R134a, com o evaporador 2.  | 134 |
| Figura B.19 – Comparação da queda de pressão numérica – experimental do ar (R134a), com o evaporador 2.                        | 134 |
| Figura B.20 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do ar (R134a), com o evaporador 2.                    | 135 |
| Figura B.21 – Comparação da taxa total de transferência de calor numérica - experimental do ar (R134a), com evaporador 2.      | 135 |
| Figura B.22 – Comparação da pressão de saída numérica – experimental do fluido (1234yf), com o evaporador 2.                   | 136 |
| Figura B.23 – Comparação da queda pressão numérica – experimental do fluido (1234yf), com o evaporador 2.                      | 136 |
| Figura B.24 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do fluido (1234yf), com o evaporador 2.               | 137 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura B.25 – Comparação da taxa de transferência de calor numérica - experimental do refrigerante (1234yf), com o evaporador 2. | 137 |
| Figura B.26 – Comparação da queda de pressão numérica – experimental do ar (1234yf), com o evaporador 2.                         | 138 |
| Figura B.27 – Comparação da temperatura de saída numérica – experimental do ar (1234yf), com o evaporador 2.                     | 138 |
| Figura B.28 – Comparação da taxa total de transferência de calor numérica - experimental do ar (1234yf), com o evaporador 2.     | 139 |

## Lista de símbolos

|              |                                       |                       |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------|
| $A$          | Área                                  | $[m^2]$               |
| $A_c$        | Área da cara da aleta                 | $[m^2]$               |
| $A_{bar}$    | Área obstruída pelas aletas           | $[m^2]$               |
| $AST$        | Área da seção transversal             | $[m^2]$               |
| $b_c$        | Altura media do canal.                | $[m]$                 |
| $Bo$         | Número de Boiling                     | $[-]$                 |
| $C$          | Taxa de capacidade do fluido          | $[kJ.s^{-1}.K^{-1}]$  |
| $c_p$        | Calor específico                      | $[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| $c_{pa}$     | Calor específico médio do ar saturado | $[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| $C_{sat}$    | Calor específico de ar saturado       | $[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$ |
| $C_x$        | Qualidade media de vapor              | $[-]$                 |
| $D$          | Diâmetro                              | $[m]$                 |
| $E$          | Fator de aumento                      | $[-]$                 |
| $Fp$         | Passo da aleta                        | $[m]$                 |
| $HO$         | Altura exterior das placas            | $[m]$                 |
| $H$          | Altura de separação da aleta          | $[m]$                 |
| $g$          | Gravidade                             | $[m.s^{-2}]$          |
| $f$          | Fator de atrito de Darcy              | $[-]$                 |
| $f_{anning}$ | Fator de atrito de fanning            | $[-]$                 |
| $G$          | Fluxo volumétrico                     | $[m^3.s^{-1}]$        |
| $Ge_1, Ge_2$ | Coeficientes de troca de calor        | $[-]$                 |
| $Ge_3, Ge_4$ | Coeficientes de queda de pressão      | $[-]$                 |
| $h$          | Entalpia específica                   | $[kJ.kg^{-1}]$        |
| $IT$         | Número de tanques                     | $[-]$                 |
| $II(IT)$     | Número de placas por tanque           | $[-]$                 |
| $IPT$        | Número de placas.                     | $[-]$                 |
| $j$          | Fator de Colburn                      | $[-]$                 |
| $JJ$         | Número de divisões da placas          | $[-]$                 |
| $k$          | Condutividade térmica                 | $[kW.m^{-1}.K^{-1}]$  |
| $k$          | Número de passos                      | $[-]$                 |
| $Kc, Ke$     | Contração abrupta e expansão          |                       |
| $L$          | Comprimento                           | $[m]$                 |
| $L_l$        | Comprimento da persiana               | $[m]$                 |
| $Lp$         | Passo de persiana                     | $[m]$                 |
| $\dot{m}$    | Vazão mássica                         | $[kg.s^{-1}]$         |

|                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| $NTU$                 | Número de unidades de transferência de calor  | [-]                                    |
| $M$                   | Massa molar                                   | [kg.mol <sup>-1</sup> ]                |
| $N_{placas_{totais}}$ | Número total de placas                        | [-]                                    |
| $Nu$                  | Número de Nusselt                             | [-]                                    |
| $pcO$                 | Comprimento do canal ou passo do canal        | [m]                                    |
| $Pr$                  | Número de Prandtl                             | [-]                                    |
| $Pr$                  | Pressão reduzida                              | [-]                                    |
| $P$                   | Pressão                                       | [kPa]                                  |
| $\Delta P$            | Queda de Pressão                              | [kPa]                                  |
| $\dot{Q}$             | Taxa de transferência de calor                | [kW]                                   |
| $q''$                 | Fluxo de calor                                | [kW.m <sup>-2</sup> ]                  |
| $Re$                  | Número de Reynolds                            | [-]                                    |
| $S$                   | Fator de diminuição                           | [-]                                    |
| $T$                   | Temperatura                                   | [K]                                    |
| $T_d$                 | Largura exterior                              | [m]                                    |
| $t$                   | Espessura do canal                            | [m]                                    |
| $U$                   | Coefficiente global de transferência de calor | [kW.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $wO$                  | Comprimento da placa                          | [m]                                    |
| $W$                   | Umidade absoluta                              | [-]                                    |
| $x$                   | Título  | [-]                                    |
| $X_{tt}$              | Fator de Martinelli                           | [-]                                    |

### Símbolos gregos

|               |  |                                       |
|---------------|--|---------------------------------------|
| $\alpha$      | Coefficiente de transferência de calor.                  | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $\beta$       | Ângulos da corrugação                                    | [radianos]                            |
| $\delta$      | Espessura da aleta                                       | [m]                                   |
| $\varepsilon$ | Efetividade  | [-]                                   |
|               | Fração do Vapor  | [-]                                   |
| $\eta$        | Eficiência   | [-]                                   |
| $\Phi$        | Taxa de comprimento desenvolvida e comprimento projetada |                                       |
| $\rho$        | Densidade  | [kg.m <sup>-3</sup> ]                 |
| $\mu$         | Viscosidade  | [N.s.m <sup>-2</sup> ]                |
| $\chi_{tt}$   | Parâmetro de Martinelli                                  | [-]                                   |
| $\delta$      | Espessura da aleta                                       | [m]                                   |
| $\phi$        | Ângulo do louver ou persiana                             | [grados]                              |
| $\sigma$      | Taxa de contração  | [-]                                   |
| $\sigma$      | Tensão superficial                                       | [N.m <sup>-1</sup> ]                  |

## Subscritos

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| <i>air</i>    | Ar                          |
| <i>c</i>      | Canais                      |
| <i>eq, ff</i> | Equivalente                 |
| <i>evap</i>   | Evaporador                  |
| <i>fin</i>    | Aleta                       |
| <i>fric</i>   | Atrito                      |
| $Ge_1, Ge_2$  | Coefficientes de correlação |
| <i>h</i>      | Hidráulico                  |
| <i>in</i>     | Ingresso                    |
| <i>l</i>      | Latente, líquido            |
| <i>LP</i>     | Louver                      |
| <i>m</i>      | Médio                       |
| <i>min</i>    | Mínimo                      |
| <i>mon</i>    | Momento                     |
| <i>out</i>    | Saída                       |
| <i>orva</i>   | Orvalho                     |
| <i>pool</i>   | Nucleado                    |
| <i>ref</i>    | Refrigerante                |
| <i>s</i>      | Sensível                    |
| <i>sat</i>    | Saturação                   |
| <i>ST</i>     | Seção transversal           |
| <i>static</i> | Estático                    |
| <i>T</i>      | Total                       |
| <i>TD</i>     | Transferência direta        |
| <i>TI</i>     | Transferência indireta      |
| <i>TP</i>     | Bifásico                    |
| <i>v</i>      | Vapor                       |
| <i>w</i>      | Condensado, molhado, parede |
| <i>web</i>    | Web                         |
| <i>wet</i>    | Molhado                     |