

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**José Miguel Mayta Tito**

**Simulação de Trocadores de Calor de Placas  
para Sistemas de Refrigeração em Cascata**

**Dissertação de Mestrado**

Orientador: Professor José Alberto dos Reis Parise  
Co-orientador: Dr. Samuel Fortunato Yana Motta

Rio de Janeiro  
Maio 2011



**José Miguel Mayta Tito**

## **Simulação de Trocadores de Calor de Placas para Sistemas de Refrigeração em Cascata**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Dr. Samuel Fortunato Yana Motta**

Co-orientador

**Prof. Carlos Valois Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Sergio Leal Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Gherhardt Ribatski**

Universidade de São Paulo

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Maio de 2011

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

### **José Miguel Mayta Tito**

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Dpto. de Engenharia Mecânica da Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú no ano de 2008. Atualmente trabalhando na simulação de equipamento de refrigeração.

#### Ficha Catalográfica

Tito, José Miguel Mayta

Simulação de trocadores de calor de placas para sistemas de refrigeração em cascata / José Miguel Mayta Tito ; orientador: José Alberto dos Reis Parise ; co-orientador: Samuel Fortunato Yana Motta. – 2011.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Refrigeração. 3. Simulação. 4. Trocadores de calor de placas soldadas. 5. Sistema em cascata. 6. Refrigerantes. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Motta, Samuel Fortunato Yana. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

“Paciência e perseverança têm o efeito mágico de fazer as dificuldades desaparecerem e os obstáculos sumirem”

John Lennon

## Agradecimentos

A Deus, pela graça de ter me permitido concluir este trabalho.

À minha família, meus pais Miguel e Juana e meus irmãos Rosa, Magaly, Pilar e Julio pelo amor, o apoio incondicional e ânimos no transcurso destes dois anos.

A José Alberto dos Reis Parise, meu orientador, pela amizade e enorme paciência que teve comigo durante estes dois anos.

A Samuel Fortunato Yan Motta, meu co-orientador pela motivação e pela confiança que teve comigo no desenvolvimento desta dissertação para levá-la a cabo.

A Paul Ortega Sotomayor, pela amizade e apoio na minha dissertação desde o começo.

A meus amigos Marco, Carlos, Andres, Luis F., Darwin, Andrea, Lorena Leydi e Sandra pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

Agradecimentos em particular para os órgãos de fomento à pesquisa CNPq, CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro fornecido, sem o qual este trabalho não teria sido possível. Por outro lado, meu agradecimento é também dirigido à empresa Honeywell Inc. pelo apoio financeiro ao projeto.

## Resumo

Mayta Tito, José Miguel; dos Reis Parise, José Alberto. **Simulação de trocadores de calor de placas para sistemas de refrigeração em cascata.** Rio de Janeiro, 2011. 151p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desenvolveu-se um modelo de simulação para trocadores de calor de placas soldadas (BPHE – “Braze Plate Heat Exchanger”) operando em regime permanente em um sistema de refrigeração em cascata por compressão de vapor, ou seja, condensador, trocador de calor intermediário (ou “condensador em cascata”) e evaporador. O modelo adota o método de análise local, onde o trocador de calor é dividido em uma série de pequenos volumes de controle, para os quais as equações de troca de calor e de conservação de massa e de energia são aplicadas. Para o cálculo dos coeficientes locais de transferência de calor e fator de atrito foram utilizadas correlações disponíveis na literatura, considerando as regiões de escoamento monofásico ou bifásico em cada um dos trocadores. Estas correlações cobrem valores de fluxo de calor entre  $2,5 \text{ kW/m}^2$  e  $185 \text{ kW/m}^2$ , temperaturas de saturação entre  $5^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ , e aplicam-se a geometrias com ângulos de corrugação entre 20 e 60 graus. Um programa computacional foi desenvolvido em FORTRAN para o cálculo do desempenho térmico dos trocadores de calor e das correlações de as[ida dos dois fluidos. Na simulação foram consideradas conhecidas as condições de entrada dos fluidos e a geometria do trocador. As propriedades termo-físicas dos fluidos foram calculadas utilizando-se a mais recente versão do padrão NIST de referência de propriedades termodinâmicas e de transporte (REFPROP 9.0), permitindo a simulação dos trocadores de calor operando com uma vasta gama de refrigerantes. Os resultados da simulação foram comparados com os dados experimentais (condensador e evaporador) levantados por outros autores para os refrigerantes R22 e R290, tendo-se obtido boa concordância. Uma análise de sensibilidade para os trocadores de calor, utilizando os novos refrigerantes R1234yf e R1234ze, foi também realizada.

## Palavras-chave

Refrigeração, simulação, trocadores de calor de placas soldadas, sistema em cascata, refrigerantes.

## Abstract

Mayta Tito, José Miguel;, dos Reis Parise, José Alberto. **Simulation of brazed plate heat exchangers for cascade vapor compression sistem**, Rio de Janeiro, 2011. 151p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A simulation model of brazed plate heat exchangers (BPHE) operating in steady-state in a cascade vapor compression refrigeration system has been developed. For this system the heat exchangers were the condenser, intermediate heat exchanger or cascade-condenser and evaporator. The model adopts a local analysis method, where the heat exchanger is divided into a series of small control volumes, to which the heat transfer rate equations and the fundamental of conservation of mass and energy equation. Local heat exchanger coefficients and friction factor are calculated using correlations available in literature, considering regions of single-phase or two-phase flow for each one of the heat exchangers. These correlations have heat flux values ranging from  $2,5\text{kW/m}^2$  to  $185\text{kW/m}^2$ , saturation temperatures from  $5^\circ\text{C}$  to  $35^\circ\text{C}$  and were applied to geometries with corrugation angle ranging from  $20^\circ$  to  $60^\circ$ . In order to calculate the thermal performance of the heat exchangers and the output conditions of the two fluids a computational program was developed in FORTRAN. This simulation considers known inlet conditions of the fluids and the geometry of the heat exchanger. The thermophysical properties of the refrigerants fluids were calculated using the version 7 of REFPROP, a package by NIST (National Institute of Standards and Technology), that allow for the simulation of heat exchangers with a wide operating range of refrigerants. The simulation results were compared with experimental data (condenser and evaporator) for R22 and R290 refrigerants, obtaining a good agreement. A sensibility analysis for heat exchangers, using the new R1234yf and R1234ze has also been carried out.

## Keywords

Refrigeration, Simulation, brazed plate heat exchangers, cascade system, refrigerants

# Sumário

1	Introdução	22
1.1.	A questão ambiental	22
1.2.	Trocadores de calor de placas	24
1.3.	Sistemas de refrigeração em cascata	26
1.4.	Justificativa	27
1.5.	Objetivo do trabalho	28
1.6.	Conteúdo do trabalho	29
2	Revisão Bibliográfica	31
2.1.	Introdução	31
2.2.	Simulações numéricas – Troca de calor monofásica	31
2.3.	Simulações numéricas – Troca de calor com mudança de fase	36
2.4.	Estudos experimentais	38
2.5.	Sistema de refrigeração em cascata	42
2.6.	Conclusões da revisão bibliográfica.	45
3	Modelo Matemático	48
3.1.	Análise do volume de controle	48
3.2.	Geometria da placa	49
3.3.	Equações de conservação	51
3.4.	Hipóteses simplificadoras para trocadores de calor a placas	52
3.5.	Equações de transferência de calor	53
3.6.	Queda de pressão nos trocadores de calor a placas	56
3.7.	Números adimensionais	58
3.8.	Condensador	60
3.8.1.	Coeficiente local de transferência de calor para a condensação	61
3.8.2.	Fator de atrito para a condensação	64
3.9.	Evaporador	64
3.9.1.	Coeficiente local de transferência de calor para a ebulição	65
3.9.2.	Fator de atrito para a evaporação	69



3.10. Condensador de Cascata ou Trocador intermediário	69
3.11. Coeficiente de troca de calor para as regiões monofásicas	70
3.12. Fator de atrito para o escoamento monofásico	72
4 Método de Solução	73
4.1. Procedimento de solução	73
4.2. Algoritmo de solução para o condensador	76
4.3. Algoritmo de solução para o evaporador	79
4.4. Algoritmo de solução para o condensador cascata	81
4.5. Critério de convergência	84
4.6. Método de relaxação	85
4.7. Programa computacional	86
5 Resultados	74
5.1. Teste de malha	74
5.2. Validação dos modelos	90
5.3. Dados experimentais	91
5.3.1. Dados experimentais para o R22 e R290 no condensador	91
5.3.2. Dados experimentais para o R22 e R290 no evaporador	95
5.4. Comparação com dados experimentais	99
5.4.1. Simulação numérica do condensador	101
5.4.1.1. Resultados da simulação do condensador com o refrigerante R22	102
5.4.1.2. Resultados da simulação do condensador com o refrigerante R290	106
5.4.2. Simulação numérica do evaporador	110
5.4.2.1. Resultados da simulação do evaporador com o refrigerante R22	110
5.4.2.2. Resultados da simulação do evaporador com o refrigerante R290	114
5.5. Comparação com dados do fabricante	118
5.5.1. Simulação numérica do condensador cascata	120
5.5.2. Comparação com o software SSP G7	121
5.5.3. Resultados da simulação do condensador em cascata	121

5.6. Análise de sensibilidade	123
6 Conclusões e sugestões	129
6.1. Conclusões	129
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	130
Referências Bibliográficas	131
APÊNDICE A	145
A.1 Resultados da simulação do condensador com o refrigerante R22	145
A.2 Resultados da simulação do condensador com o refrigerante R290	147
A.3 Resultados da simulação do evaporador com o refrigerante R22	148
A.4 Resultados da simulação do evaporador com o refrigerante R290	150

## Lista de figuras

Figura 1 Breve história e evolução dos refrigerantes ao longo dos anos (Calm,2008).	23
Figura 2 Típico trocador de calor de placas brazadas (Wang et al. 2007).	24
Figura 3 Parâmetros físicos e princípio de funcionamento de um BPHE (Stenhede,2001).	25
Figura 4 Esquema do sistema de refrigeração em cascata. (Bayrakci, 2010).	26
Figura 5 Diagrama P –h para um sistema de refrigeração em cascata teórico. (Lee et al. 2006).	27
Figura 6 Trocador de calor de placas e volume de controle elementar.	48
Figura 7 (a) Condições de entrada e de saída do refrigerante e do fluido de transferência de calor no volume de controle elementar. (b) Esquema real e dimensões do volume de controle elementar.	48
Figura 8 (a) Parâmetros geométricos do tipo placa Chevron (b) Seção transversal e geometria do canal (Kakaç e Liu, 2002).	49
Figura 9 Circuito térmico equivalente para a troca de calor em determinado trecho de um PHE.	55
Figura 10. Diagrama de temperaturas no condensador.	60
Figura 11 – (a) Condensador de placas – Marca Alfa Laval. (b) Representação esquemática do condensador de placas.	60
Figura 12. Diagrama de temperaturas para os PHEs usados como evaporador.	64
Figura 13. (a) Evaporador de placas – Alfa Laval. (b) Representação esquemática dos fluxos no evaporador de placas.	65
Figura 14. Diagrama de temperaturas para os PHEs usados como condensador cascata.	70
Figura 15 Diagrama de percorrido dos fluidos no condensador.	76
Figura 16 Diagrama de percorrido dos fluidos no evaporador.	79
Figura 17 Diagrama de temperaturas dos fluidos no	

trocador intermediário e sentido de cálculo do trocador de calor.	81
Figura 18 Teste de malha para o condensador de placas.	88
Figura 19 Teste de malha para o evaporador de placas.	89
Figura 20 Teste de malha para o trocador intermediário de placas.	90
Figura 21 Comparação de dados da taxa total de transferência de calor numérica com a experimental.	102
Figura 22 Erro relativo da taxa total de transferência de calor versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	103
Figura 23 Erro da temperatura de saída do refrigerante versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	103
Figura 24 Erro da temperatura de saída do fluido de resfriamento versus a vazão mássica do fluido de resfriamento no condensador.	104
Figura 25 Erro de UA versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	105
Figura 26 Comparação de dados da taxa de transferência de calor numérica com a experimental.	106
Figura 27 Erro relativo da taxa de transferência de calor versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	107
Figura 28 Erro da temperatura de saída do refrigerante versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	107
Figura 29 Erro da temperatura de saída do fluido de resfriamento versus a vazão mássica para o condensador.	108
Figura 30 Erro de UA versus a vazão mássica do refrigerante no condensador.	109
Figura 31 Comparação de dados da taxa de transferência de calor numéricos com os experimentais.	111
Figura 32 Erro relativo da taxa de transferência de calor versus a vazão mássica do refrigerante para o evaporador.	111
Figura 33 Erro da temperatura de saída do refrigerante versus a vazão mássica do refrigerante no evaporador.	112
Figura 34 Erro da temperatura de saída do fluido secundário versus a vazão mássica para o evaporador.	113
Figura 35 Erro de UA versus a vazão mássica do refrigerante	

para o evaporador.	113
Figura 36 Comparação entre dados numéricos e experimentais da taxa de transferência de calor.	115
Figura 37 Erro relativo da taxa de transferência de calor versus a vazão mássica do refrigerante no evaporador.	115
Figura 38 Erro da temperatura de saída do refrigerante versus vazão mássica do refrigerante no evaporador.	116
Figura 39 Erro da temperatura de saída do fluido secundário versus a vazão mássica do fluido secundário no evaporador.	117
Figura 40 Erro de UA versus a vazão mássica do refrigerante no evaporador.	117
Figura 41 Perfis das temperaturas dos refrigerantes em função da posição do elemento no trocador de calor intermediário.	122
Figura 42 Variação dos coeficientes de transferência ao longo do trocador de calor intermediário.	122
Figura 43 Variação do título de vapor ao longo do trocador de calor intermediário.	123
Figura 44 Taxa de transferência de calor versus vazão mássica do fluido secundário.	126
Figura 45 Temperatura de saída do refrigerante versus a vazão mássica do fluido secundário.	126
Figura 46 Condutância versus a vazão mássica do fluido secundário.	127
Figura 47 Queda de pressão versus vazão mássica do fluido secundário.	127
Figura 48 Coeficiente de transferência de calor local versus título de vapor.	128
Figura 49 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do refrigerante R22 no condensador.	145
Figura 50 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do fluido de resfriamento no condensador.	146
Figura 51 Comparação da condutância numérica e experimental.	146
Figura 52 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do refrigerante R290 no condensador.	147

Figura 53 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do fluido de resfriamento no condensador.	147
Figura 54 Comparação das condutâncias numérica e experimental no condensador.	148
Figura 55 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do refrigerante no condensador.	148
Figura 56 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do fluido secundário no evaporador.	149
Figura 57 Comparação das condutâncias no evaporador.	149
Figura 58 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do refrigerante.	150
Figura 59 Comparação das temperaturas de saída numérica e experimental do fluido secundário.	150
Figura 60 Comparação das condutâncias numérica e experimental no evaporador.	151

## Lista de tabelas

Tabela 1 Correlações empíricas para o coeficiente de transferência de calor em condensação e suas condições de operação.	63
Tabela 2 Correlações empíricas para o coeficiente de transferência de calor e suas condições de operação na evaporação.	67
Tabela 3- Correlações para o coeficiente de transferência de calor para escoamento monofásico em trocadores de calor de placas.	71
Tabela 4 Dados gerais do trocador de calor de placas soldadas utilizado para o condensador e evaporador (NIST, 1999).	90
Tabela 5 Condições de operação do refrigerante R22 no condensador (NIST, 1999).	91
Tabela 6 Condições de operação do fluido de resfriamento no condensador (NIST, 1999).	92
Tabela 7 Condições de operação do refrigerante R290 no condensador (NIST, 1999).	93
Tabela 8 Condições de operação do fluido de resfriamento no condensador (NIST, 1999).	94
Tabela 9 Condições de operação do refrigerante R22 no evaporador (NIST, 1999).	95
Tabela 10 Condições de operação do fluido secundário no evaporador (NIST, 1999).	96
Tabela 11 Condições de operação do refrigerante R290 no evaporador (NIST, 1999).	97
Tabela 12 Condições de operação do fluido secundário no evaporador (NIST, 1999).	98
Tabela 13 Combinações das correlações de transferência de calor e queda de pressão na região bifásica para o condensador.	100
Tabela 14 Combinações das correlações de transferência de calor e queda de pressão para o evaporador.	100
Tabela 15 Dados de entrada no condensador de placas.	101
Tabela 16 Erro médio das combinações na simulação	

do condensador de placas para o refrigerante R22.	105
Tabela 17 Erro médio das combinações das correlações na simulação do condensador para o refrigerante R290.	109
Tabela 18 Dados de entrada do evaporador de placas.	110
Tabela 19 Erro médio das combinações das correlações na simulação do evaporador de placas para o refrigerante R22.	114
Tabela 20 Erro médio das correlações na simulação do evaporador de placas para o refrigerante R290.	118
Tabela 21 Condições de operação para o software SSP G7.	119
Tabela 22 Parâmetros obtidos do software SSP G7.	119
Tabela 23 Dados gerais do trocador de calor de placas utilizado como condensador em cascata.	119
Tabela 24 Dados de entrada do condensador em cascata de placas.	120
Tabela 25 Condições de entrada para os refrigerantes.	120
Tabela 26 Comparação de dados obtidos das simulações.	121
Tabela 27 Estados termodinâmicos para o R22 no evaporador.	124
Tabela 28 Dados gerais do trocador de calor de placas soladas para o evaporador.	124
Tabela 29 Condições iniciais de operação do evaporador.	125
Tabela 30 Variação da vazão mássica do fluido secundário.	125



## Lista de Símbolos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$b$	Folga média do canal	[m]
$Bo$	Número de ebulição	
$c$	Razão entre as capacidades caloríficas dos fluidos	
$c_p$	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg K]
$C^*$	Capacidade calorífica	[kJ/K]
$Co$	Número convectivo	
$D$	Diâmetro	[m]
$E$	Energia	[kW]
$F$	Profundidade do trocador	[m]
$f$	Fator de atrito	
$Fr$	Número de Froude	
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G$	Fluxo mássico	[kg/m <sup>2</sup> .s]
$Ge_1, Ge_2,$ $Ge_3, Ge_4$	Parâmetros da correlação de Han et al.(2003)	
$h$	Entalpia específica	[kJ/kg]
$Ja$	Número de Jakob	
$k$	Condutividade térmica	[kW/m.K]
$L$	Comprimento da placa	[m]
$m$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$N$	Número	
$Nu$	Número de Nusselt	
$NUT$	Número de unidades de transferência de calor	
$p$	Altura da corrugação	[m]
$p_{co}$	Passo da corrugação	[m]

$P$	Pressão	[kPa]
$Pr$	Número de Prandtl	
$P$	Perímetro	[m]
$Re$	Número de Reynolds	
$q''$	Fluxo de calor	[kW/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor	[kW]
$t$	Espessura da placa	[m]
$T$	Temperatura	[K]
$u$	Velocidade	[m/s]
$U$	Coefficiente global de transferência de calor	[kJ/kg K]
$W$	Largura da placa	[m]
$\dot{W}_{util}$	Potência útil	[kW]
$x$	Titulo de vapor	
$z$	Altura	[m]

## Símbolos gregos

$\alpha$	Coeficiente de transferência de calor	[kW/m <sup>2</sup> .K]
$\beta$	Ângulo de corrugação ou Chevron	
$\Delta$	Diferença	
$\varepsilon$	Efetividade	
$\phi$	Fator de ampliação (dado pelo fabricante)	
$\gamma$	Fração de vazio	
$\mu$	Viscosidade cinemática	[Pa.s]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]

## Subscritos

<i>ave</i>	Médio
<i>c</i>	Critico
<i>CD</i>	Condensador
<i>chan</i>	Canais
<i>cold</i>	Frio
<i>div</i>	Divisões
<i>elem</i>	Elemento
<i>eq</i>	Equivalente
<i>EV</i>	Evaporador
<i>f</i>	Atrito
<i>flu</i>	Fluido
<i>h</i>	Hidráulico, horizontal
<i>hot</i>	Quente
<i>in</i>	Entrada
<i>l</i>	Líquido, laminar
<i>máx</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>mom</i>	Momentum
<i>out</i>	Saida
<i>p</i>	Porta
<i>plate</i>	Placa
<i>projetada</i>	Projetada
<i>real</i>	Real
<i>ref</i>	Refrigerante
<i>sat</i>	Saturação
<i>sta</i>	Estático
<i>t</i>	Turbulento
<i>total</i>	Total

<i>trans</i>	Transversal
<i>v</i>	Vapor, vertical
<i>VC</i>	Volume de controle
<i>wall</i>	Parede