

**Epifanio Mamani Ticona**

**Determinação Experimental  
das Características de  
Transferência de Calor de um  
Gerador de Pasta de Gelo**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro  
Março de 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Epifanio Mamani Ticona**

**Determinação Experimental das  
Caraterísticas de Transferência de Calor de  
um Gerador de Pasta de Gelo**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga  
Co-Orientador: Prof. José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro  
Março de 2007



**Epifanio Mamani Ticona**

**Determinação Experimental das  
Caraterísticas de Transferência de Calor de  
um Gerador de Pasta de Gelo**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo**

PUC-Rio

**Prof. Carlos Valois Maciel Braga**

PUC-Rio

**Prof. José Viriato Coelho Vargas**

UFPR

**Prof. Juan José Milón Guzmán**

Universidad Católica San Pablo

**Prof. Alejandro Pablo Arena**

Centro Regional de Investigaciones Científicas e  
Tecnológicas, Argentina

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Março de 2007

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

### **Epifanio Mamani Ticona**

Graduou-se em Engenharia na Universidad Nacional San Agustin (Arequipa, Perú), possui graduação em dupla Habilitação: Engenharias Mecânica/Elétrica. Desenvolveu, para a obtenção de seu grau de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, um sistema de geração de pasta de gelo no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento da PUC-Rio, dando início a uma nova linha de pesquisa, na área de sistemas de armazenamento de energia e fluidos térmicos avançados.

Ficha Catalográfica

Ticona, Epifanio Mamani

Determinação Experimental das Características de Transferência de Calor de um Gerador de Pasta de Gelo / Epifanio Mamani Ticona ; orientador: Sergio Leal Braga ; co-orientador: José Alberto dos Reis Parise. — 2007.

177 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Armazenamento de energia térmica. 3. Pasta de gelo. 4. Trocador de calor de superfície raspada. 5. Fluidos refrigerantes secundários bifásicos. I. Braga, Sergio Leal. II. Parise, José Alberto dos Reis. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

Aos meus orientadores Professores Sergio Leal Braga e José Alberto dos Reis Parise, pelo ensinamento, apoio de sempre, pela paciência e incentivo para a realização deste trabalho. Expresso toda minha gratidão, ao Professor Parise, pelo auxílio nas correções ao redigir o presente documento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, Bartolome e Simona, minha permanente gratidão e admiração.

Aos meus irmãos Wilfredo, o grande Jaime, Patricia e toda minha família.

A todos meus amigos. Em especial, aos que conheci na acolhedora comunidade da PUC-Rio: Elizabet, Mao, Frank, Daniel, Hugo, Paul, Luis. E amigos do laboratório de Reologia: Juliana, Raul, Joel, Sygifredo, Teresa, Melisa, Danmer.

Aos professores membros da banca examinadora, pelos comentários e valorosas sugestões para a elaboração do documento final.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, que contribuíram com meu crescimento profissional, pessoal e a realização deste trabalho.

Aos funcionários do ITUC/PUC-Rio.

## Resumo

Ticona, Epifanio Mamani; Braga, Sergio Leal; Parise, José Alberto dos Reis. **Determinação Experimental das Características de Transferência de Calor de um Gerador de Pasta de Gelo.** Rio de Janeiro, 2007. 177p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um gerador de pasta de gelo foi desenvolvido para o estudo experimental de suas características de transferência de calor. Uma das características da pasta de gelo é que pode ser bombeada como qualquer líquido. O gerador de pasta de gelo é um evaporador, do tipo trocador de calor de superfície raspada com intensificação mecânica de transferência de calor. Foi estabelecida a influência de vários parâmetros na transferência de calor no gerador de pasta de gelo: a vazão mássica, a velocidade de rotação do raspador, a temperatura da parede na interface, a temperatura de operação da solução aquosa, entre outros. Estudou-se tanto a transferência de calor com ou sem mudança de fase. Utilizaram-se soluções aquosas de etanol com diferentes concentrações. A pasta de gelo era produzida continuamente sem acumulação no evaporador. O gerador era parte de um sistema integral contendo os seguintes componentes: o sistema de medição da fração de gelo “on-line”, através da medição da massa específica da pasta de gelo; uma bomba helicoidal de cavidade progressiva, que permitia controlar a vazão, por meio de um variador de frequência; um aquecedor elétrico, atuando como carga térmica, com a possibilidade de variar a capacidade desta carga térmica e, com isto, o controle da temperatura de operação do sistema; e o sistema de aquisição de dados. Foi estabelecido um modelo para determinar, experimentalmente, o número de Nusselt e, por conseguinte, o coeficiente interno de transferência de calor da pasta de gelo. Utilizou-se uma unidade condensadora convencional, com R22 como fluido refrigerante. A pasta de gelo resultante era bombeada continuamente em um circuito fechado, assegurando o estudo de um fluido homogeneamente distribuído, visto que o circuito não permitia a acumulação de pasta de gelo. Os sistemas de geração de pasta de gelo apresentam potencial para reduzir significativamente os custos de capital inicial e operação, quando comparados com tecnologias de sistemas de termoacumulação estáticos de gelo ou dinâmicos, como o “ice harvesting”.

### Palavras-chave

Armazenamento de energia térmica, Trocadores de calor de superfície raspada, Pasta de gelo, Fluidos refrigerantes secundários bifásicos

## Abstract

Ticona, Epifanio Mamani; Braga, Sergio Leal; Parise, José Alberto dos Reis. **Experimental determination of heat transfer characteristic in an ice slurry generator**. Rio de Janeiro, 2007. 177p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An ice slurry generator for was developed for the experimental study of its heat transfer characteristics. One of the main characteristic of ice slurry is that it can be pumped as any liquid. The ice slurry generator is an evaporator, with mechanical heat transfer enhancement, by surface scraping. The dependence of several parameters on heat exchanger performance was established. They included: mass flow rate, scraped rotational velocity, surface temperature, solution operating temperature. Single and two-phase flow was studied. Aqueous ethanol solutions, of different concentrations, were used. Ice slurry was produced on a continuous basis. The experimental apparatus consisted of the heat exchanger itself, an on-line ice mass fraction measurement device, a helicoidal positive displacement variable flow rate pump, an electrical heater, the data acquisition system and a R22 condensing unit. The ice slurry was pumped continuously on a closed circuit, providing a homogeneous fluid, as no accumulation of ice was possible. Ice slurry systems have the potential of significant reduction on capital and maintenance costs, when compared to traditional technologies, static or dynamic, of ice thermoaccumulation.

## Keywords

Cold Thermal energy storage; Scraped surface evaporators, Ice slurry, Secondary refrigerants.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Fluidos refrigerantes primários e secundários	19
1.2	Pasta de gelo	21
1.2.1	Definições	21
1.2.2	Vantagens da tecnologia de pasta de gelo	23
1.3	Objetivos da presente pesquisa	25
1.4	Revisão Bibliográfica	26
1.5	Produção de pasta de gelo	28
1.5.1	Geração de pasta de gelo por super-resfriamento	29
1.5.2	Geração de pasta de gelo por contato direto	29
1.5.3	Geração de pasta de gelo por vácuo	30
1.5.4	Geradores de pasta de gelo de superfície raspada	31
1.6	Organização do trabalho	33
<b>2</b>	<b>Características e propriedades termofísicas da pasta de gelo</b>	<b>34</b>
2.1	Propriedades Termofísicas do gelo e de soluções aquosas	34
2.1.1	Propriedades Termofísicas do Gelo	34
2.1.2	Propriedades Termofísicas de soluções aquosas	37
2.2	Propriedades Termofísicas da pasta de gelo	41
2.2.1	Temperatura de solidificação da pasta de gelo	41
2.2.2	Massa específica da pasta de gelo	43
2.2.3	Condutividade térmica da pasta de gelo	44
2.2.4	Entalpia da pasta de gelo	45
2.2.5	Calor específico aparente da pasta de gelo	49
2.2.6	Viscosidade dinâmica da pasta de gelo	50
<b>3</b>	<b>Aparato experimental</b>	<b>53</b>
3.1	Descrição do sistema	55
3.1.1	A bomba hidráulica	55
3.1.2	O gerador de pasta de gelo	56
3.1.3	A carga térmica	59
3.1.4	O medidor de vazão e massa específica da pasta de gelo	59
3.1.5	A unidade condensadora	61
3.1.6	O medidor de vazão do fluido refrigerante	61
3.1.7	O painel de controle elétrico	61
3.1.8	Isolamento térmico	62
3.2	Instrumentação da instalação experimental	63
3.2.1	Medição da temperatura	63
3.2.2	Medição da pressão	63
3.2.3	Medição da potência elétrica da carga térmica	64
3.2.4	Aquisição de dados	65
3.3	Procedimento experimental	66
3.4	Processamento dos dados	68



3.4.1	Funções macro utilizadas no processamento de dados	69
3.4.2	Procedimento de processamento e redução dos dados	71
<b>4</b>	<b>Trocadores de calor de superfície raspada</b>	<b>72</b>
4.1	Parâmetros adimensionais	74
4.2	Características de transferência de calor sem mudança de fase	76
4.2.1	Modelo de penetração de calor	76
4.2.2	Correlações empíricas para a transferência de calor	82
4.3	Transferência de calor com mudança de fase	84
4.3.1	Correlações Empíricas para a transferência de calor com mudança de fase	84
4.4	Metodologia para a determinação experimental do número de Nusselt	89
4.4.1	Análise de condução unidimensional	91
4.4.2	O caso da condução multidimensional	92
4.5	Cálculo da taxa de transferência de calor no gerador	103
4.5.1	Potência mecânica dissipada devido ao mecanismo raspador	104
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>109</b>
5.1	Considerações iniciais	109
5.1.1	Tamanho e forma dos cristais de gelo	109
5.1.2	Análise do regime transiente da geração de pasta de gelo	111
5.2	Validação do modelo de determinação experimental do número de Nusselt	116
5.3	Número de Nusselt para troca de calor sem mudança de fase	121
5.4	Comparação da transferência de calor com mudança de fase	125
<b>6</b>	<b>Conclusões e recomendações para trabalhos futuros</b>	<b>135</b>
6.1	Conclusões	135
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	137
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>138</b>
<b>A</b>	<b>Análise de Incertezas</b>	<b>146</b>
A.1	Avaliação da incerteza padrão do tipo A	146
A.2	Incerteza padrão do tipo B	148
A.3	Medição de uma magnitude com diferentes métodos de medição	148
A.4	Determinação das incertezas	150
A.4.1	Propriedades termofísicas	150
A.4.2	Taxa de transferência de calor na interface	151
A.4.3	Fração de gelo	151
A.4.4	Número de Reynolds rotacional	152
A.4.5	Número de Reynolds axial	152
A.4.6	Número de Prandtl	153
A.4.7	Potência dissipada	153
A.4.8	Número de Nusselt local	153
A.4.9	Número de Nusselt médio	154
<b>B</b>	<b>Medida da fração de gelo na pasta de gelo</b>	<b>155</b>
B.1	Métodos de medição de fração de gelo	155

B.1.1	Determinação da fração de gelo por medição da temperatura da pasta de gelo	156
B.1.2	Determinação da fração de gelo por medição da energia interna da pasta de gelo	156
B.1.3	Determinação da fração de gelo por medição da massa específica	157
B.2	Método adotado	157
B.3	Parâmetros e variáveis importantes	158
B.4	Dados experimentais e redução de dados	160
B.5	Resultados	161
<b>C</b>	<b>Medida de Temperatura</b>	<b>163</b>
C.0.1	Redução dos dados	164
C.1	Medição de diferença de temperatura	164
C.1.1	Calibração da termopilha	165
C.1.2	Ajuste por mínimos quadrados	166
<b>D</b>	<b>Planejamento da tese</b>	<b>168</b>
D.1	A serpentina de tubo de cobre	168
D.2	O circuito hidráulico	171
<b>E</b>	<b>Especificações técnicas dos outros componentes</b>	<b>172</b>
<b>F</b>	<b>Solução da Equação de transferência de calor por condução</b>	<b>176</b>

## Lista de Figuras

1.1	Diagrama de um sistema de refrigeração com ciclos primário e secundário e termoacumulação.	20
1.2	Fotografia de cristais de gelo em uma pasta de gelo (tamanho da fotografia $1061 \mu\text{m} \times 762 \mu\text{m}$ ) [4].	23
1.3	Área total, A, de todos os cristais de gelo supostamente esféricos de diâmetro $d_p$ em 1 kg de pasta de gelo [4].	24
1.4	Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por super-resfriamento da água.	29
1.5	Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por contato direto de fluidos.	30
1.6	Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por vácuo [15].	31
1.7	Esquema de sistemas de geração de pasta de gelo. a) Gerador com raspadores planos [27], b) Gerador com raspadores de haste metálica Paul Mueller Co. [14], c) Gerador de discos [15], d) Gerador com raspador helicoidal [26].	32
2.1	Massa específica e viscosidade dinâmica de uma solução etanol-água obtidas com a Eqs. 2-7 e 2-9, propostas por Melinder [52]. Os números na figura representam as linhas de fração em massa do soluto constante.	39
2.2	Calor específico e condutividade térmica de uma solução etanol-água obtidos com a Eq. 2-7, proposta por Melinder [52]. Os números na figura representam linhas de fração em massa do soluto constante.	41
2.3	Variação da temperatura de solidificação com a concentração de uma solução aquosa de etanol, e diagrama de fase de uma solução aquosa.	42
2.4	A formação dos cristais de gelo muda a concentração do fluido portador.	43
2.5	Massa específica da pasta de gelo com uma solução etanol-água.	44
2.6	Condutividade térmica da pasta de gelo com solução etanol-água.	46
2.7	Diagrama de fase de entalpia de uma solução de cloreto de sódio-água.	47
2.8	Entalpia da pasta de gelo de uma solução etanol-água.	50
2.9	Calor específico aparente da pasta de gelo.	51
2.10	Viscosidade dinâmica da pasta de gelo.	52
3.1	Sistema de geração de pasta de gelo.	53
3.2	Fotografia do sistema de geração de pasta de gelo.	54
3.3	(a) Fotografia da bomba helicoidal NEMO (com motor elétrico acionador e isolante térmico) e (b) detalhe interno da bomba.	56
3.4	Fotografia do gerador de pasta de gelo.	57
3.5	Diagrama interno do gerador de pasta de gelo.	58

3.6	Fotografia e esquema do aquecedor elétrico.	60
3.7	Fotografia e esquema do medidor de vazão e da massa específica da pasta de gelo CMF050 ELITE® em conjunto com o RTD.	60
3.8	Fotografia do medidor de vazão de fluido refrigerante CMF010 ELITE®.	62
3.9	Fotografia do painel elétrico.	62
3.10	Detalhe de localização de termopar na parede de troca de calor.	63
3.11	Detalhe de localização do medidor de pressão.	64
3.12	Fotografia do aquisitor de dados.	65
3.13	Interface de aquisição de dados.	66
4.1	Trocador de calor de superfície raspada.	73
4.2	Fotografia do interior do gerador.	73
4.3	Número de Reynolds rotacional crítico $Re_{r,crit}$ versus a razão de diâmetros $d/D$ .	75
4.4	Vista de topo de um trocador de calor de superfície raspada com o raspador mostrando a camada de líquido estacionário removida periodicamente pelos raspadores.	77
4.5	Considerações geométricas na equação de difusão de calor, perto da interface do fluido com a parede.	78
4.6	Perfis de temperatura em diferentes tempos após a passagem do raspador na camada líquida da interface.	80
4.7	Distribuição da temperatura adimensional $\theta$ , vista de topo de um trocador de calor de superfície raspada com um raspador.	80
4.8	Esquema de trocador de calor de superfície raspada e componentes de velocidade.	86
4.9	Comparação do número de Nusselt do modelo (Eq. 4-46) com o número de Nusselt experimental e a fração de gelo, por Bel & Lallemand [26].	87
4.10	Evolução da temperatura de parede (ponto 6) para um trocador de calor operando com solução aquosa de sacarose, concentração 15%, vazão 0,14 m/s e velocidade de rotação do mecanismo raspador de 700 rpm [27].	88
4.11	Distribuição de temperatura na parede do trocador.	90
4.12	Condução bidimensional em uma parede plana rectangular.	93
4.13	Gradiente de temperatura na interface com diferentes razões de aspecto $W/L$ .	96
4.14	Relação entre o gradiente de temperatura na interface e a temperatura adimensional $\theta(x, W)$ .	97
4.15	Condução bidimensional em uma parede plana rectangular, com distribuição uniforme de temperatura.	97
4.16	Relação entre o gradiente de temperatura na interface e a temperatura adimensional $\theta(x, W)$ (caso 2).	98
4.17	Temperaturas $T_m, T_{p,i}, T_{p,e}$ .	99
4.18	Campo de temperaturas.	100
4.19	Medidor de fluxo de calor de filme delgado ("Thin Film Heat Flux Sensor").	101
4.20	Volume de controle do gerador de pasta de gelo.	104

4.21	Sistema composto pelo gerador de pasta de gelo.	107
4.22	Resultado da variação do número de potência com o número de Reynolds rotacional.	108
5.1	Foto de cristais de gelo em uma amostra de pasta de gelo produzida a partir de uma solução de etanol com concentração em massa de 12% e fração de gelo de 0,22 kg/kg, a uma temperatura ambiente de 20 °C.	110
5.2	Foto de cristais de gelo em uma amostra de pasta de gelo produzida a partir de uma solução de etanol com concentração em massa de 12% e fração de gelo de 0,22 kg/kg, a uma temperatura ambiente de 20 °C.	110
5.3	Evolução da temperatura e massa específica da pasta de gelo ao longo do processo de geração da pasta de gelo na entrada e saída do gerador, com uma concentração de etanol de 12%, vazão de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador, 11 s <sup>-1</sup> .	111
5.4	Evolução da temperatura e fração de gelo da pasta de gelo ao longo do processo de geração da pasta de gelo na entrada e saída do gerador, com concentração de etanol 12%, vazão de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador, 11 s <sup>-1</sup> .	112
5.5	Registro de um incidente onde ocorreu o desligamento da bomba do sistema devido ao aumento da fração de gelo. Pode-se observar as flutuações na medida da massa específica antes do desligamento. Condições de operação: concentração de etanol, 15,8% e frequência de rotação do mecanismo raspador, 9 s <sup>-1</sup> .	113
5.6	Variação da vazão da pasta de gelo com valor pre-fixado no variador de frequência. Condições de operação: concentração de etanol, 12%; vazão em regime permanente de 0,18 kg/s e frequência de rotação do mecanismo raspador, 11 s <sup>-1</sup> .	114
5.7	Variação da vazão com uma bomba centrífuga CAM W-4C DANCOR, com solução aquosa de etanol de 13% e frequência de rotação do mecanismo raspador, 6 s <sup>-1</sup> .	115
5.8	Exemplo de como o controle da carga térmica permite atingir o regime permanente no processo de geração da pasta de gelo. Condições de operação: concentração de etanol, 12%; vazão de 0,18 kg/s e a frequência de rotação do mecanismo raspador, 11 s <sup>-1</sup> .	116
5.9	Verificação experimental da relação linear entre o fluxo médio de calor na interface, $\overline{q''}$ , e a diferença de temperatura média, $\overline{\Delta T}_z$ , (Eq. 4-95).	117
5.10	Variação do número de Nusselt com a posição axial com rotor parado ( $N = 0$ ), sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol com concentração de 27%, vazão 0,29 kg/s, $Pr = 70$ e $Re_a = 350$ (escoamento laminar).	118

5.11	Comparação do número de Nusselt local experimental e o número de Nusselt pela correlação de Lundberg et al. [77], para escoamentos anulares (Eq. 5-2 ). Foi utilizada solução aquosa de etanol com concentração de 27%, vazão de 0,29 kg/s, $Pr = 70$ , $Re_a = 350$ (escoamento laminar).	120
5.12	Comparação do número de Nusselt experimental médio para condições de escoamento sem mudança de fase e o número de Nusselt da correlação obtida, equação (5-5).	122
5.13	Comparação do número de Nusselt médio experimental com outras correlações da literatura.	123
5.14	Comparação do número de Nusselt médio experimental com correlações da literatura, para os quais os números de $Re_a$ , $Re_r$ e $Pr$ estão dentro dos limites de validade do presente trabalho.	124
5.15	Variação da fração de gelo com a temperatura.	125
5.16	Variação da diferença entre as temperaturas médias da parede interna e do fluido, $\bar{T}_{p,i}$ e $\bar{T}_m$ com o número de Nusselt.	126
5.17	Variação com a temperatura do coeficiente interno de transferência de calor com e sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol de 15%, vazão média de operação 0,12 kg/s, frequência de rotação do eixo do raspador $9,4 \text{ s}^{-1}$ e temperatura média de evaporação do fluido refrigerante de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ .	127
5.18	Variação com a temperatura do coeficiente interno de transferência de calor com e sem mudança de fase, com solução aquosa de etanol de 15%, vazão média de operação 0,25 kg/s, frequência de rotação do eixo do raspador $11,9 \text{ s}^{-1}$ e temperatura média de evaporação do fluido refrigerante de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ .	127
5.19	Variação do número de Nusselt devido à ação do mecanismo de raspagem e à mudança de fase, conforme Stamatiou et al. [16].	128
5.20	Variação do número de Nusselt com o número de Reynolds rotacional.	128
5.21	Variação do número de Nusselt com o número de Reynolds axial.	129
5.22	Variação do número de Nusselt com o número de Prandtl.	129
5.23	Comparação do número de Nusselt médio experimental com o número de Nusselt calculada pela Eq. 5-7 .	132
5.24	Comparação do número de Nusselt médio experimental com correlações disponíveis na literatura para condições semelhantes ao do presente trabalho.	132
5.25	Comparação do número de Nusselt médio experimental com o número de Nusselt previsto por correlações da literatura.	133
5.26	Esquema de mecanismo helicoidal que escova a superfície do gerador [26].	134
5.27	Evolução da temperatura de parede (ponto 6) para um trocador de calor operando com solução aquosa de sacarose, concentração 15%, vazão 0,14 m/s e velocidade de rotação do mecanismo raspador de 700 rpm [27].	134

B.1	Incertezas associadas à determinação da fração de gelo por medição da temperatura da pasta de gelo.	156
B.2	Esquema de medição da massa específica com medidor Coriolis e medição externa de temperatura com RTD e transmissor RFT9739.	159
B.3	Medição da massa específica das soluções aquosas de água-etanol com diferentes frações, sem calibração.	159
B.4	Medição da massa específica das soluções aquosas de água-etanol com diferentes frações, após a calibração.	160
B.5	Variação da massa específica do medidor após a calibração.	162
C.1	Fotografia de banho termostático para a calibração dos termopares.	164
C.2	Error de medição de termopar.	165
C.3	Esquema de uma termopilha.	167
C.4	Especificações de adesivo e pasta térmica Omega.	167
D.1	Esquema do tubo de cobre em contato na parede do gerador de pasta de gelo e a distribuição de temperatura prevista por solução numérica.	169
D.2	Diagrama de distribuição da temperatura (resultado da modelagem numérica).	169
D.3	Esquema do tubo de cobre com aleta na parede do gerador de pasta de gelo e o perfil de temperatura previsto para a mesma.	170
D.4	Diagrama de perfil de temperatura prevista numericamente, para uma superfície com aleta.	170
E.1	Especificações técnicas da unidade condensadora.	173
E.2	Especificações técnicas da unidade condensadora (continuação).	174
E.3	Performance do compressor.	175

## Lista de Tabelas

2.1	Coeficientes $C_{ij}$ da equação polinomial de Melinder [52]	40
5.1	Coeficientes para a obtenção do número de Nusselt local em escoamentos laminares em dutos anulares com razão de diâmetros $r^* = d/D$ e um comprimento adimensional $\bar{z}$ [77].	119
B.1	Coeficientes de calibração para medição de massa específica do CORIOLIS CMF025	161
B.2	Coeficientes de calibração para medição de massa específica do CORIOLIS CMF050	161



## Lista de Símbolos

$A$	área da interface, $m^2$
$c_p$	calor específico a pressão constante, $kJ/kg \cdot K$
$C$	relação entre gradiente de temperatura e diferença de temperatura
$C_D$	coeficiente de arrasto
$D$	diâmetro interno do gerador, m
$D_h = D - d$	diâmetro hidráulico, m
$d$	diâmetro do rotor, m
$F_D$	Força de arrasto, N
$H_{Tmf}$	linha de entalpia de mudança de fase
$h$	entalpia específica interna, $kJ/kg$
$h$	coeficiente de transferência de calor, $W/m^2 \cdot K$
$k$	condutividade térmica, $W/m \cdot K$
$L$	comprimento do raspador, m
$L_c$	Dimensão característica, m
$N$	freqüência de rotação do rotor, $s^{-1}$
$n_R$	número de raspadores
$\overline{Nu}$	número de Nusselt médio
$Nu_z$	número de Nusselt local
$\dot{m}$	vazão mássica, $kg/s$
$p_i$	parâmetro
$P$	potência dissipada pelo raspador, W
$Pe$	número de Péclet
$Po$	número de Potência
$Pr$	número de Prandtl
$\dot{Q}$	taxa de transferência de calor, W
$q''$	fluxo de calor, $W/m^2$
$R = \frac{D}{2}$	Raio interno do gerador, m
$R_p$	Resistência térmica da parede, $K/W$
$Re_a$	número de Reynolds axial
$Re_r$	número de Reynolds rotacional
$r$	coordenada radial, m
$r^* = d/D$	razão de diâmetros
$s$	desvio padrão experimental da média
$t$	tempo, s
$T$	temperatura, $^{\circ}C$
$T_m$	temperatura de mistura, $^{\circ}C$
$T_{pi}$	temperatura da parede interna, $^{\circ}C$
$T_{pe}$	temperatura da parede externa, $^{\circ}C$

$u_{pi}$	incerteza padrão relativa do parâmetro $p_i$
$\dot{V}$	fluxo volumétrico, m <sup>3</sup> /s
$v_a$	velocidade axial média, m/s
$x$	concentração ou fração em massa, kg/kg
$w$	velocidade do raspador, m/s
$z$	coordenada axial, m
$\bar{z}$	comprimento adimensional

### Símbolos Gregos

$\alpha_l$	difusividade térmica do meio, m <sup>2</sup> /s
$\Delta T$	diferença de temperatura, K
$\Delta h_M$	entalpia de reação, kJ/kg
$\delta p_i$	incerteza padrão do parâmetro $p_i$
$\theta$	temperatura adimensional
$\mu$	viscosidade dinâmica, Pa · s
$\nu$	viscosidade cinemática, m <sup>2</sup> /s
$\rho$	massa específica, kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	período de tempo entre a passagem de raspadores
$\varphi$	concentração em volume ou fração volumétrica, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\psi$	coeficiente de correção do modelo teórico
$\Phi_{bi}$	multiplicador bifásico

### Índices

$i$	interno
$e$	entrada, externo
$fp$	fluido portador
$g$	gelo
$l$	líquido
$m$	mistura
$o$	total (global)
$p$	parede
$pg$	pasta de gelo
$Ref$	referência
$s$	saída
$teor$	teórico

Joy in looking and comprehending is nature's gift

**Albert Einstein, .**