



José Jaime Ravelo Chumioque

**“Simulação de um Sistema de Refrigeração com
Termoacumulação operando em Regime
Transiente”**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento da Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores:

Prof. Sergio Leal Braga

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro

Maio 2004



José Jaime Ravelo Chumioque

**“Simulação de um Sistema de
Refrigeração com Termoacumulação
operando em Regime Transiente”**

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

Prof. Sergio Leal Braga
Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientadores
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira
Departamento de Engenharia Mecânica – UCP-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Sectorial do Centro
Técnico Científico – PUC- Rio

Rio de Janeiro, 6 de Maio de 2004.

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

José Jaime Ravelo Chumioque

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Nacional de Ingeniería Lima-Perú em 1984. Atualmente tem desenvolvido um modelo de simulação para um sistema de Refrigeração para condicionamento do ar no Laboratório de Refrigeração e Aquecimento (LRA) dando início a novas pesquisas na área de simulação e sistemas de armazenamento de energia térmica usadas em sistemas de condicionamento de ar de grande porte.

Ficha Catalográfica

Chumioque, José Jaime Ravelo

Simulação de um sistema de refrigeração com termoacumulação operando em regime transiente / José Jaime Ravelo Chumioque ; orientadores: Sergio Leal Braga, José Alberto dos Reis Parise – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

153 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Simulação. 3. Refrigeração. 4. Termoacumulação. 5. Chiller. 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

A Deus
A meus pais
A Sonia e Alicia.

Agradecimentos

A meus orientadores Professores Sergio Leal Braga e José Alberto dos Reis Parise pelo estímulo, apoio e parceria para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, Perú, pela educação e o apoio de sempre.

A todos meus amigos e colegas da PUC-Rio, especialmente do LRA.

Ao Professor Daniel Herencia da UNI pelo artigo que foi de muita ajuda e esclarecedor.

Ao professor Carlos Eduardo Reuther de Siqueira pelo apoio no desenvolvimento da simulação numérica.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma ou de outra forma me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Chumioque, José Jaime Ravelo; Sergio Leal Braga, José Alberto Parise. **Simulação de um Sistema de Refrigeração com Termoacumulação operando em Regime Transiente**. Rio de Janeiro, de 2004. 153. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho versa sobre o estudo e modelagem de um sistema de refrigeração para ar condicionado de edifícios. O modelo considera um sistema de compressão de vapor de grande porte, chamado habitualmente chiller; um tanque de armazenamento de água gelada e uma torre de resfriamento. Para o desenvolvimento do modelo utilizam-se as equações constitutivas e as equações de conservação da massa e energia em todos seus componentes. O modelo permite obter as condições de funcionamento ótimo do sistema de refrigeração reduzindo o tamanho de seus componentes (menor custo de investimento) e o consumo de energia (custo de operação) em correspondência com o diagrama de carga térmica do edifício. Consideram-se as variações da temperatura do meio ambiente ao longo do dia (transiente horário) para estudar a influência destas variações no desempenho global do sistema de refrigeração. Aplica-se o modelo à obtenção das características dos componentes do sistema de refrigeração para condicionamento de ar de um dos blocos do prédio “Cardeal Leme” da PUC-Rio. No presente estudo, a estratégia de operação usada é um fator decisivo na seleção da melhor alternativa econômica.

Palavras-chave

1-Simulação, 2- Refrigeração, 3- Termo-acumulação, 4- Chiller.

Abstract

Chumioque, José Jaime Ravelo; Sergio Leal Braga, José Alberto Parise.
Simulation of a Cooling System of with Thermal Storage operating in Transient Regime. Rio de 2004. 153p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work aims the study and modeling of a system of refrigeration systems for air-conditioning in buildings. The model considers a high capacity vapor-compression refrigeration system, for water cooling (chiller); a tank of thermal storage tank and a cooling tower. For the development of the model the constitutive equations and the equations of conservation of mass and energy are used over all its components. The model provides the optimal operating conditions of the refrigeration system to reduce the size of its components (lesser cost of investment) and the energy consumption (operation cost) according to the thermal load of the building. Daily temperature variations of the environment are taken into account (hourly transient) in order to study the influence of these variations over the global performance of the refrigeration system. The model is applied to the study of the air conditioning system of one block of the “Cardeal Leme” building, at PUC-Rio. In the present study, the strategy employed is a key factor in the selection of the best economical alternative.

Keys words

1- Simulation, 2- Refrigeration, 3- Thermal-Storage, 4- Chiller.

Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Objetivo	23
1.2.	Definição do sistema a ser estudado	24
1.3.	Descrição do sistema global	25
1.3.1.	Subsistema primário	25
1.3.2.	Subsistema secundário ou de distribuição	25
1.3.3.	Subsistema auxiliar	26
1.4.	Características e alternativas de uso dos componentes do sistema global	26
1.5.	Funcionamento do sistema global	27
1.6.	Termoacumulação	28
1.6.1.	Objetivos da termoacumulação	29
1.6.2.	Estratégias de operação	29
1.6.2.1.	Armazenamento total	30
1.6.2.2.	Armazenamento parcial com nivelamento de carga	30
1.6.2.3.	Armazenamento com carga básica	32
1.6.2.4.	Armazenamento operando com vários chillers	32
1.6.3.	Acumuladores de calor sensível	32
1.6.3.1.	Acumuladores por estratificação	32
1.6.3.2.	Acumuladores de tanques múltiplos	32
1.6.3.3.	Acumuladores de diafragma flexível	33
1.6.3.4.	Acumuladores de labirintos	33
1.7.	Organização da dissertação	33
2	Modelo Matemático	34
2.1.	Estrutura e descrição física do sistema global - modos de operação	34
2.2.	Modos de operação	35
2.2.1.	Operação de resfriamento e acumulação (modo 1)	36

2.2.2. Operação de resfriamento com tanque de armazenamento (modo 2).	36
2.2.3. Operação de acumulação pura (modo 3)	37
2.2.4. Operação conjunta (modo 4)	38
2.3. Revisão bibliográfica	39
2.3.1. Literatura sobre modelagem de sistemas de refrigeração por compressão de vapor e de componentes de chillers	39
2.3.2. Literatura sobre modelagem de torres de resfriamento	41
2.3.3. Literatura sobre modelagem de tanques de armazenamento	42
2.4. Considerações para o modelo adotado	45
2.4.1. Considerações para o chiller	45
2.4.2. Considerações para a torre de resfriamento	46
2.4.3. Considerações para o tanque de armazenamento	47
2.4.3.1. Análise e equação de governo	48
2.4.3.2. Solução da temperatura	50
2.4.3.3. Transferência de calor do ambiente	52
2.4.3.4. Eficiência do tanque de armazenamento	52
2.4.3.5. Métodos numéricos	53
2.4.3.6. Resultados - valores paramétricos	53
2.4.3.7. Transferência de calor do ambiente	54
2.4.3.8. Espessura da termoclina	56
2.4.3.9. Eficiência de armazenamento estratificado	59
2.5. Considerações específicas para o modelo do sistema completo	62
2.6. Modelagem	63
2.6.1. Hipóteses básicas para o modelo do chiller	63
2.6.2. Modelos matemáticos dos componentes do chiller	64
2.6.2.1. Volume de controle e equações do evaporador	64
2.6.2.2. Volume de controle e equações para o compressor parafuso	67
2.6.2.3. Volume de controle e equações para o condensador	68
2.6.2.4. Volume de controle e equações para o dispositivo de expansão	69
2.6.3. Hipóteses básicas para o modelo do tanque de armazenamento	70
2.6.4. Volume de controle e equações do tanque de armazenamento	70
2.6.4.1. Operação do tanque no modo 1	71

2.6.4.2. Operação do tanque no modo 2	73
2.6.4.3. Operação do tanque modo 3	74
2.6.4.4. Operação do tanque no modo 4	76
2.6.4.5. Eficiência do tanque de armazenamento	77
2.6.5. Hipóteses básicas para o modelo da torre de resfriamento de contato direto	79
2.6.6. Volume de controle e equações da torre de resfriamento de contato direto	79
2.6.7. Volume de controle e equações dos “fan-coils”	80
2.7. Volumes de controle e equações para o sistema Global	81
2.7.1. Volumes de controle e equações do sistema operando sem armazenamento	81
2.7.2. Equação do sistema global-modo 1	83
2.7.3. Equação do sistema global - modo 2	84
2.7.4. Equação do sistema global - modo 3	85
2.7.5. 3 Equação do sistema global - modo 4	86
2.8. Coeficiente de performance (COP)	87
2.9. Determinação das propriedades dos refrigerantes	87
2.9.1. Propriedades do refrigerante primário R-22	87
2.9.2. Propriedades do refrigerante secundário - água (R-718)	88
2.9.3. Propriedades da mistura ar-água	88
3 Solução	89
3.1. Algoritmos de Solução	90
3.1.1. Algoritmo N° 1	91
3.1.2. Algoritmo N° 2	92
3.1.3. Algoritmo N° 3	93
3.2. Dados de entrada do modelo	94
3.2.1. Dados de entrada comuns	94
3.2.2. Análise de sensibilidade dos parâmetros do compressor	95
3.2.3. Dados de entrada para obter os parâmetros característicos do chiller	95
3.2.4. Dados de entrada - caso 1	96

3.2.5. Dados entrada – casos 2 e 3	97
3.2.6. Dados de entrada – para calcular a capacidade do chiller: casos 2 e 3	98
3.3. Dados de saída	98
3.3.1. Dados de saída - parâmetros característicos do chiller	98
3.3.2. Dados de saída – caso 1, 2 e 3	99
3.3.3. Lista das variáveis de saída	99
3.4. Critérios de convergência	99
3.5. Critérios e faixas de operação dos parâmetros do chiller	99
4 Resultados	101
4.1. Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do chiller	102
4.2. Resultados da simulação propriamente dita	107
4.3. Análise de custos das alternativas	110
4.3.1. Determinação da alternativa de menor custo de operação	110
4.3.2. Determinação dos custos de investimento para cada alternativa	120
4.3.2.1. Cálculo do custo dos equipamentos	121
4.3.2.2. Análise do tempo de recuperação do capital	122
4.3.2.3. Volume e geometria do tanque de armazenamento	123
4.3.3. Seleção da estratégia de operação	123
4.3.4. Seleção dos componentes	124
5 Conclusões	126
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	127
6 Referências bibliográficas	128
7 Apêndice	133
7.1. Temperaturas de bulbo seco no dia típico	133
7.2. Carga térmica da PUC	134
7.3. Curva de desempenho do chiller tipo parafuso TRANE- modelo RTHB215	136
7.4. Tarifas de energia elétrica da Light Serviços de Eletricidade S.A.	137
7.5. Listagem de programas	141

7.5.1. Programa para obter os parâmetros característicos do chiller	141
7.5.2. Programa para obter o consumo de energia quando o chiller acompanha a carga	143
7.5.3. Programa para obter o consumo de energia - modo1	145
7.5.4. Programa para obter o consumo de energia - modo 3	148
7.5.5. Programa para obter o consumo de energia - modo 4	150
7.5.6. Programa para o calculo a capacidade do chiller nos casos 2 e 3	152

Lista de figuras

Figura 1- Sistema típico de água gelada.	24
Figura 2- Subsistema primário	25
Figura 3- Subsistema auxiliar	26
Figura 4 - Ciclo de refrigeração modificado	28
Figura 5- Diagrama de carga atendida com termoacumulação	29
Figura 6- Armazenamento a carga total	30
Figura 7- Operação a carga nivelada	31
Figura 8- Operação com carga limitada	31
Figura 9- Sistema de refrigeração para condicionamento de ar com termoacumulação em regime de carga. Resfriamento e acumulação (modo 1).	35
Figura 10- Modos de operação do sistema com termoacumulação	36
Figura 11- Resfriamento exclusivamente com tanque de armazenamento (modo 2)	37
Figura 12- Modo de operação de acumulação pura (modo 3)	38
Figura 13- Fluxo uniforme unidimensional através de um tanque vertical.	48
Figura 14- Ganho de energia do meio ambiente (como uma função ideal da capacidade de resfriamento do tanque) durante o processo de carga para $Pe_H = 3$. (Homan et al., 1996).	55
Figura 15- Tempo morto requerido para o armazenamento de fluido quente para uma temperatura máxima permitida. (Homan et al., 1996).	55
Figura 16- Perfis de temperatura num tanque de paredes adiabáticas durante o processo de carga. (Homan et al., 1996).	56
Figura 17- Espessura da termoclina em cada etapa do processo de carga. (Homan et al., 1996).	57

Figura 18- Razões de difusividade para tanque de armazenamento de água solar e resfriada. (Homan et al.,1996).	59
Figura 19- Historia da temperatura de saída para um processo de carga e descarga num tanque de paredes adiabáticas. (Homan et al.,1996).	59
Figura 20- Volumes de tanque da água resfriada, necessário para produzir um tanque completamente carregado. (Homan et al.,1996).	60
Figura 21- Eficiência de um tanque de armazenamento estratificado segundo a primeira lei. (Homan et al.,1996).	62
Figura 22- Volume de controle do evaporador.	65
Figura 23- Volume de controle do compressor.	67
Figura 24- Volume de controle do condensador.	68
Figura 25- Volume de controle da válvula de expansão.	69
Figura 26- Volume de controle do tanque de armazenamento operando no modo 1.	71
Figura 27- Volumes de controle das tubulações anexas ao tanque de armazenamento operando no modo 1.	72
Figura 28- Volume de controle do tanque de armazenamento operando no modo 2.	73
Figura 29- Volumes de controle das tubulações anexas ao tanque operando no modo 2.	74
Figura 30- Volume de controle do tanque de armazenamento operando no modo 3.	74
Figura 31- Volumes de controle das tubulações anexas ao tanque operando no modo 3.	75
Figura 32- Volume de controle do tanque de armazenamento operando no modo 4.	76
Figura 33- Volumes de controle das tubulações anexas ao tanque operando no modo 4.	77
Figura 34- Volume de controle da torre de resfriamento aberta.	79
Figura 35- Volume de controle dos fan-coils.	80
Figura 36- Volume de controle do chiller.	81
Figura 37- Volume de controle do sistema hidráulico operando sem armazenamento.	82

Figura 39- Volume de controle do sistema hidráulico operando no modo 2.	84
Figura 40- Volume de controle do sistema hidráulico operando no modo 3.	85
Figura 41- Volume de controle do sistema hidráulico operando no modo 4.	86
Figura 42- Consumo do compressor vs eficiência adiabática do compressor.	103
Figura 43- Consumo do compressor vs eficiência mecânica do compressor.	103
Figura 44- Consumo do compressor vs eficiência da torre de resfriamento.	104
Figura 45- Consumo do compressor vs efetividade do evaporador	104
Figura 46- Consumo do compressor vs efetividade do condensador	105
Figura 47- Coeficiente de desempenho vs a temperatura de evaporação	105
Figura 48- Coeficiente de desempenho vs Temperatura de condensação	106
Figura 49- Temperatura da água na saída do evaporador vs vazão mássica da água no evaporador	106
Figura 50- Temperatura da água na saída do condensador vs vazão mássica da água no condensador.	107
Figura 51- Variação do coeficiente de desempenho do chiller no período de 7 a 23 horas.	107
Figura 52- Variação do consumo do chiller no período de 7 a 23 horas	109
Figura 53- Consumo do chiller vs a carga térmica do prédio.	109
Figura 54- Consumo do chiller vs a temperatura do meio ambiente.	109

Lista de tabelas

Tabela 1: Configurações avaliadas.	27
Tabela 2- Condições para um projeto típico e para a operação de sistemas de armazenamento de água fria estratificada.	54
Tabela 3- Eficiência do compressor.	102
Tabela 4- Consumo de energia em função da temperatura do meio ambiente e da carga térmica.	108
Tabela 5- Demanda tarifa azul do quadro B da Light (Apêndice 7.4).	111
Tabela 6- Consumo tarifa azul do quadro C da Light (Apêndice 7.4).	111
Tabela 7- Demanda tarifa verde do quadro E da Light (Apêndice 7.4).	111
Tabela 8- Consumo tarifa verde do quadro C da Light (Apêndice 7.4).	111
Tabela 9- Custos de energia horária e total para o caso 1 - tarifa azul.	112
Tabela 10- Custos de energia horária e total para o caso 1-tarifa verde	113
Tabela 11- Determinação do modo de operação para o cálculo do consumo no caso 2.	114
Tabela 12- Custos de energia horária e total para o caso 2-tarifa azul.	115
Tabela 13- Custos de energia horária e total para o caso 2-tarifa verde	116
Tabela 14- Determinação do modo de operação para o cálculo do consumo no caso 3	117
Tabela 15- Custos de energia horária e total para o caso 3- tarifa azul	118
Tabela 16- Custos de energia horária e total para o caso 3- tarifa azul	119
Tabela 17- Custos totais de energia por caso e tarifa.	119
Tabela 18- Alternativas de menores custos tarifários	120
Tabela 19- Capacidade de armazenamento e geometria do tanque	120
Tabela 20- Custos unitários e características de equipamentos de termoacumulação (Dorgan, 1994)	121
Tabela 21-Custo dos equipamentos	121
Tabela 22- Análise econômico do tempo de recuperação de capital.	122

Tabela 23- Geometria do tanque de armazenamento.	123
Tabela 24- Comparação final das alternativas.	124
Tabela 25- Características do componentes do sistema de termoacumulação condições nominais.	125

Lista de símbolos

A	área da secção transversa do tanque de armazenamento (m ²)
COP	coeficiente de desempenho(-)
c_p	calor específico à pressão constante (kJ / kg °C)
d	espessura de parede (m)
D	diâmetro do tanque de armazenamento (m)
$\frac{dU}{dt}$	taxa de variação de energia interna (kW)
$\left(\frac{\Delta U}{\Delta t}\right)$	taxa de variação aproximada de energia interna (kW)
\dot{E}_c	potência consumida (kW)
FOM	figura de mérito
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
h	entalpia específica (kJ/kg)
H	altura do tanque de armazenamento (m)
k	condutividade térmica (W/m -°C)
\dot{m}	vazão mássica (kg/s)
N	velocidade angular ou de rotação (s-1)
NTU	número de unidades de transferência de calor (-)
Nu	número de Nusselt (-)
P	perímetro do tanque (m)
Pe	número de Peclet (-)
Pr	número de Prandtl (-)
p	pressão (Pa)
Q	calor transferido (J)
\dot{Q}	carga, taxa de transferência de calor, potencia térmica (W)
q	fluxo de calor por unidade de área (W/m ²)
Re	Número de Reynolds (-)
T, \hat{T}	temperatura (°C)
\bar{T}	temperatura média do volume de controle (°C)

U	coeficiente de perda térmico, coeficiente global de transferência de calor ($W/ m^2 \cdot ^\circ C$).
t	tempo (s)
t_s	escala de tempo (-)
v	velocidade ou velocidade convectiva da água no tanque de armazenamento (m/s)
\hat{y}	coordenada axial medida ao longo do eixo vertical do tanque (m)
x	título (-)
UA	condutancia térmica global ($W/ ^\circ C$)
u	energia interna específica (J/kg)
V	volume (m^3)
v	volume específico (m^3/kg)
w_k	trabalho ideal adiabático por unidade de massa (kJ/kg)
\dot{W}	potência (W)
y	coordenada vertical

Letras Gregas

α	difusividade térmica (m^2/s)
δ	espessura de termoclina (m)
Δ	diferença
ε	efetividade de um trocador de calor (-), difusividade efetiva (-)
η	eficiência (-)
ρ	densidade (kg/ m^3)
μ	viscosidade dinâmica (kg/s.m)
ν	viscosidade cinemática (m^2/s)

Subscritos

a	ambiente, água no evaporador, ar, armazenado
amb	ambiente
at	atmosférica
c	processo de carga, condensador, compressor

e	evaporador
bhar	bulbo úmido do ar do meio ambiente.
cd	condensador
cp	compressor
D	diâmetro do tanque
d	processo de descarrega
ev	evaporador, evaporação
h	processo de descarga
i	processo de carga
m	mecânica
max	maxima
mc	média no condensador
me	média no evaporador
mta	média no tanque
no	nominal
r	refrigerante
s	cantidade de escalamento, processo isoentrópico
st	armazenamento
T	térmica
ta	tanque de armazenamento
torre	torre de resfriamento
vet	válvula de expansão termostática
1	entrada do refrigerante ao compressor-superaquecimento.
2	saída de refrigerante do compressor
3	saída de refrigerante do condensador-subresfriamento
4	saída de refrigerante da válvula de expansão
5	saída da água do evaporador ou chiller
6	saída ou entrada da água gelada do tanque de armazenamento
7	entrada da água na bomba B2.
8	entrada da água nos fan-coils
9	saída da água dos fan-coils
10	saída da água da válvula VRP
11	saída ou entrada de água quente do tanque de armazenamento
12	entrada da água na bomba B1

- 13 saída da água do evaporador
- 14 saída da água da torre de resfriamento
- 15 entrada da água no condensador
- 16 saída da água do condensador
- 17 entrada de ar ambiente à torre de resfriamento
- 18 saída do ar da torre de resfriamento.