



Gustavo Fernando Dorregaray Portilla

Simulação de Sistemas de Refrigeração em Supermercados

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: José Alberto dos Reis Parise
Co-orientador: Samuel Fortunato Yana Motta

Rio de Janeiro
Abril de 2010



Gustavo Fernando Dorregaray Portilla

Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados

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

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – RJ

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de abril de 2010

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

Gustavo Fernando Dorregaray Portilla

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Faculdade de Ciências e Engenharia da PUCP (Pontifícia Universidade Católica do Peru), em 2006. Atualmente tem atuado na área de Petróleo e Energia, concentrando seus esforços na análise de consumo energético em supermercados e seu impacto ambiental das alternativas apresentadas.

Ficha Catalográfica

Portilla, Gustavo Fernando Dorregaray

Simulação de sistemas de refrigeração em supermercados / Gustavo Fernando Dorregaray Portilla ; orientadores: José Alberto dos Reis Parise, Samuel Fortunato Yana Motta. – 2010.

128 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Refrigeração. 3. Supermercados. 4. Energia. 5. Impacto ambiental. 6. Simulação. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Motta, Samuel Fortunato Yana IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

“A sorte ajuda os audazes” – Virgílio.

Agradecimentos

A meus pais Fernando e Charo e meu irmão Eduardo por seu amor e apoio incondicional.

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

A Samuel Fortunato Yana Motta, meu co-orientador, pelo conhecimento fornecido ao longo do desenvolvimento desta dissertação e pela motivação e confiança que teve comigo para levá-la a cabo.

A meus amigos de apartamento Raul, Ivan, Cesar e Harry, 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 simplesmente não teria sido possível. Por outro lado, meu agradecimento é também dirigido à empresa Honeywell Inc., pelo apoio financeiro ao projeto.

Resumo

Portilla, Gustavo Fernando Dorregaray; Parise, Jose Alberto dos Reis. **Simulação de sistema de refrigeração em supermercados**. Rio de Janeiro, 2010. 128p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desenvolveu-se um modelo termodinâmico para cálculo do consumo energético e do impacto ambiental (LCCP e TEWI) em sistemas de refrigeração de supermercados para três diferentes configurações (expansão direta, fluido secundário e em cascata). O modelo termodinâmico trabalha solidário com o pacote de cálculo de propriedades REFPROP e determina diversos parâmetros de funcionamento do ciclo de refrigeração, tais como o COP e a capacidade de refrigeração. O modelo simula sistemas operando com substâncias puras ou misturas delas, podendo estas ser azeotrópicas ou não-azeotrópicas. Procede-se a uma análise do tipo BIN (Intervalo) a partir de informações climatológicas anuais de cada cidade e ao cálculo do consumo anual de energia para cada intervalo considerando-se o consumo do compressor, das bombas, se for o caso específico da utilização de fluido secundário, e também o consumo energético dos expositores frigoríficos. Realizou-se, também, uma análise da carga total (inventário) do refrigerante no supermercado. Finalmente, conhecidos o consumo energético anual, a massa total de refrigerante contido no sistema e estimativa de seu vazamento anual, e outros fatores ambientais, procedeu-se ao cálculo do LCCP (Life cycle climate performance) e do TEWI (Total equivalent warming impact), em quilogramas equivalentes de CO₂. Um programa computacional, com interface baseada na plataforma Visual-Basic 6.0, com aplicações para Excel, foi desenvolvido para a solução dos sistemas de equações resultantes do modelo matemático desenvolvido. Os resultados obtidos com o código computacional foram comparados com dados de campo e de outros modelos.

Palavras-chave

Refrigeração; supermercados; energia; impacto ambiental; simulação.

Abstract

Portilla, Gustavo Fernando Dorregaray; Parise, Jose Alberto dos Reis (Advisor). **Refrigeration Systems simulation in Supermarkets**. Rio de Janeiro, 2010. 128p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A thermodynamic model was developed for the evaluation of energy consumption and environmental impact (LCCP and TEWI) of supermarket refrigeration systems operating in three different configurations (direct expansion, secondary fluid and cascade). The model simulates refrigeration systems operating with pure substances or a mixture (azeotropic or non-azeotropic) of them. A BIN analysis is carried out taking into account year-round climate data for each city and the annual energy consumption, in each time interval, of each component: compressor, pumps, freezers and coolers. Refrigerant inventory was also calculated. Finally, with the annual energy consumption, total refrigerant charge, annual leakage estimate, environmental impact indicators LCCP (Life cycle climate performance) and TEWI (Total equivalent warming impact), in kilograms equivalent of CO₂, were calculated. A computational code, with interface based on Visual Basic 6.0 platform, was developed for the solution of the resulting systems of equations that form the mathematical model. Predicted results were compared with field data and with data predicted from other models.

Keywords

Refrigeration, supermarkets, energy, environmental.

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Consumo energético em supermercados	19
1.2. Principais características dos sistemas de refrigeração em supermercados	20
1.3. Aspecto ambiental - Indicadores	27
1.4. Objetivo do trabalho	31
1.5. Justificativa	31
1.6. Estado da arte	32
1.7. Contribuição do presente trabalho	35
1.8. Conteúdo do Trabalho	36
2. Modelo matemático	37
2.1. Descrição dos sistemas	37
2.1.1. Sistema de expansão direta	37
2.1.2. Sistema com fluido secundário	40
2.1.3. Sistema de ciclos em cascata	43
2.2. Hipóteses simplificadoras para todos os sistemas	45
2.3. Cálculo da carga térmica do supermercado	46
2.4. Queda de pressão nas tubulações	47
2.5. Modelo termodinâmico	50
2.5.1. Equações de conservação	51
2.5.2. Cálculo da vazão mássica	52
2.5.3. Eficiência isentrópica	54
2.5.4. Condensador	54
2.5.5. Evaporador	54
2.5.6. Sub-resfriador Mecânico	55
2.5.7. Outros elementos do ciclo	56
2.5.8. Cálculo do COP (Coeficiente de desempenho) do ciclo termodinâmico	58
2.6. Cálculo da potência dos compressores	58

2.6.1. Cálculo da potência dos compressores de baixa temperatura	58
2.6.2. Cálculo da potência dos compressores de temperatura média	58
2.7. Cálculo da potência elétrica das bombas (Sistema com fluido secundário)	59
2.7.1. Cálculo da potência elétrica das bombas de baixa temperatura	59
2.7.2. Cálculo da potência elétrica das bombas de média temperatura	60
2.8. Cálculo do consumo anual de energia dos compressores mediante a análise BIN	61
2.9. Cálculo do consumo anual de energia no circuito de baixa temperatura e média temperatura	62
2.10. Cálculo da massa total de refrigerante no supermercado	62
2.10.1. Cálculo da massa de refrigerantes nas tubulações	62
2.10.2. Cálculo da massa de refrigerante nos distribuidores de sucção, descarga e de líquido	64
2.10.3. Cálculo de massa de refrigerante no condensador	64
2.10.4. Cálculo de massa de refrigerante no evaporador	66
2.10.5. Cálculo da massa de refrigerante no tanque Reservatório de líquido	66
2.10.5.1. Tanques reservatórios verticais	67
2.10.5.2. Tanques reservatórios horizontais	68
2.10.6. Cálculo de massa de refrigerante no compressor	69
2.10.7. Massa total de refrigerante no supermercado	69
2.11. Cálculo de TEWI (Total Equivalent Warming Impact)	69
2.12. Análise LCCP (Life Cycle Climate Performance)	70
 3. Método de solução	 72
3.1. Introdução	72
3.2. Dados de entrada	73
3.2.1. Dados de entrada gerais no programa	73
3.2.2. Dados característicos dos componentes do sistema	74
3.3. Plataforma computacional	75
3.4. Desenvolvimento do código computacional	76
3.5. Procedimento computacional	76

3.5.1. Algoritmo geral do ciclo termodinâmico para cada condição de operação	77
3.5.2. Algoritmo específico para misturas não azeotrópicas	83
3.5.2.1. Algoritmo para o condensador	84
3.5.2.2. Algoritmo para o Evaporador	86
4. Validação do modelo	87
4.1. Introdução	87
4.2. Validação do modelo desenvolvido	88
4.2.1. Comparação com o trabalho teórico de Kazachki (2007) Simulação do consumo energético dos compressores de um supermercado	88
4.2.2. Comparação como o trabalho experimental de Sawalha (2008) Simulação do COP de sistema cascata operando com amônia e CO ₂	95
4.2.3. Comparação com trabalho teórico da Arthur D. Little (2002) Simulação do consumo energético global e do LCCP de um supermercado	97
4.3. Conclusão	101
5. Resultados	102
5.1. Sistema de expansão direta	102
5.2. Sistema com fluido secundário	110
5.3. Sistema Cascata	112
5.4. Comparação dos sistemas (DX, FS e Cascata)	118
6. Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	121
6.1. Conclusões	121
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	122

Lista de tabelas

Tabela 1 - Requerimentos de temperaturas para diferentes produtos (Baxter et al., 2004)	23
Tabela 2 - Cargas de refrigeração específicas para diferentes expositores frigoríficos (Henderson e Khattar, 1996)	47
Tabela 3 - Diagrama de Moody (Fischer, 2003)	49
Tabela 4 - Valores de K para acessórios com junção aparafusada (ASHRAE, 1985)	50
Tabela 5 - Valores de K para acessórios com junção de flange soldado (ASHRAE, 1985)	50
Tabela 6 - Dada geral da simulação (Kazachki, 2007)	89
Tabela 7 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado	89
(Kazachki, 2007)	89
Tabela 8 - Análise BIN do trabalho de Kazachki (2007) para expansão direta	90
Tabela 9 - Resultados obtidos com o modelo para expansão direta	91
Tabela 10 - Dados gerais da simulação	92
Tabela 11 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado	92
(Kazachki, 2007)	92
Tabela 12 - Análise BIN do trabalho do Kazachki (2007) para fluido secundário	93
Tabela 13 - Análise BIN do trabalho do presente modelo para fluido secundário	94
Tabela 14 - Parâmetros básicos de funcionamento do sistema cascata	96
Tabela 15 - Resultados globais da simulação	96
Tabela 16 - Resultados do COP do presente modelo	96
Tabela 17 - Tabela comparativa entre os resultados de Sawala (2008) e o presente modelo	97
Tabela 18 - Dados gerais da simulação	98

Tabela 19 - Dados específicos do sistema de refrigeração do supermercado	98
Tabela 20 - Consumo Energético anual, TEWI e o LCCP, previstos para o presente modelo (expansão direta)	99
Tabela 21 - Consumo Energético anual, TEWI e o LCCP, previstos para o presente modelo (fluido secundario)	100
Tabela 22 - Tabela comparativa entre os resultados de Arthur D. Little (2002) e o presente modelo	100
Tabela 23 - Dados gerais de locação e do sistema a ser utilizado	102
Tabela 24 - Condições de operação do sistema	103
Tabela 25 - Consumo energético e LCCP para R404A – Expansão direta	103
Tabela 26 - Consumo energético e LCCP para R407A - Expansão direta	105
Tabela 27 - Consumo energético e LCCP para R407C - Expansão direta	106
Tabela 28 - Consumo energético e LCCP para o R407F	107
Tabela 29 - Comparação entre os diferentes refrigerantes – Expansão direta	109
Tabela 30 - Consumo energético e LCCP para o R407F – Fluido secundário	111
Tabela 31 - Parâmetros de funcionamento do sistema em cascata	113
Tabela 32 - Consumo energético e LCCP para a Cascata (R407F/CO ₂)	113
Tabela 33 - Consumo energético e LCCP para o sistema em Cascata (R407F/R410A)	115
Tabela 34 - Tabela comparativa para o sistema cascata	117

Lista de figuras

Figura 1 - Percentual de consumo energético da refrigeração respectivo a outros sistemas (Panesi, 2008)	20
Figura 2 - Planta da disposição de expositores em um supermercado (Baxter et al., 2004)	21
Figura 3 - Tipos de expositores frigoríficos (Baxter et al., 2004)	23
Figura 4 - Corte transversal de um expositor multi-plataforma (Baxter et al., 2004)	24
Figura 5 - Percentual de consumo energético da refrigeração em um supermercado (Baxter et al., 2004)	26
Figura 6 - Sistema de expansão direta para baixa e média temperatura	38
Figura 7 - Diagrama p-h para o ciclo de refrigeração de expansão direta - Baixa temperatura.	38
Figura 8 - Diagrama p-h para o ciclo de refrigeração de expansão direta - Média temperatura.	39
Figura 9 - Sistema de fluido secundário para baixa e média temperatura	41
Figura 10 - Diagrama p-h para o ciclo de refrigeração de expansão direta trabalhando com fluido secundário - Baixa temperatura.	41
Figura 11 - Diagrama p-h para o ciclo de refrigeração de expansão direta trabalhando com fluido secundário - Média temperatura.	42
Figura 12 - Sistema de cascata de alta e baixa temperatura	44
Figura 13 - Diagrama p-h para os ciclos em cascata	44
Figura 14 - Diagrama P-h do ciclo termodinâmico operando com R404A (exemplo)	59
Figura 15 - Distribuição das tubulações na montante e na jusante do evaporador	63
Figura 16 - Distribuição das tubulações na montante e na jusante do condensador	65
Figura 17 - Carga de refrigerante em trocadores de calor (Poggi et al., 2008)	66

Figura 18 - Geometria do tanque vertical	67
Figura 19 - Geometria do tanque horizontal	68
Figura 20 - Diagrama P-h (a) para um refrigerante puro ou mistura azeotrópica e (b) para uma mistura não-azeotrópica	77
Figura 21 - Diagrama Erro vs. Temperatura do líquido saturado	84
Figura 22 - Ciclo de refrigeração mostrando as pressões de condensação e de evaporação	85
Figura 23 - Comparação entre o presente modelo e o de Kazachki – kWh/ano (2007)	92
Figura 24 - Figura comparativa entre ambas as opções – kWh/ano	95
Figura 25 - Gráficos de barras do consumo energético R404A – Expansão direta	104
Figura 26 - Gráfico de barras para LCCP R404A – Expansão direta	104
Figura 27 - Gráfico de barras do consumo energético R407A – Expansão direta	105
Figura 28 - Gráfico de barras para LCCP R407A – Expansão direta	105
Figura 29 - Gráfico de barras do consumo energético R407C – Expansão direta	106
Figura 30 - Gráfico de barras para LCCP R407C – Expansão direta	107
Figura 31 - Gráfico de barras do consumo energético R407F – Expansão direta	108
Figura 32 - Gráfico de barras para LCCP R407F – Expansão direta	108
Figura 33 - Gráfico de comparação entre alternativas (consumo de energia)	109
Figura 34 - Gráfico de comparação entre alternativas (LCCP)	110
Figura 35 - Gráfico de barras do consumo energético com R407F – Fluido secundário	111
Figura 36 - Gráfico de barras para LCCP com R407F – Fluido secundário	112
Figura 37 - Gráfico de barras do consumo energético a Cascata (R407F/CO ₂)	114
Figura 38 - Gráfico de barras para LCCP no sistema em Cascata (R407F/CO ₂) – Sistema de baixa Temperatura	114

Figura 39 - Gráfico de barras para LCCP no sistema em Cascata (R407F/CO2) – Sistema de alta Temperatura	115
Figura 40 - Gráfico de barras do consumo energético – Sistemas em cascata	116
(R407F/R410A)	116
Figura 41 - Gráfico de barras para LCCP a Cascata (R407F/410A) – Baixa Temperatura	116
Figura 42 - Gráfico de barras para LCCP a Cascata (R407F/R410A) – Alta Temperatura	117
Figura 43 - Gráfico de barras para o consumo energético (Circuito em cascata)	117
Figura 44 - Gráfico comparativo de barras para do LCCP do sistema em cascata	118
Figura 45 - Gráfico de barras da comparação entre as alternativas (Consumo energético)	119
Figura 46 - Gráfico de barras da comparação entre as alternativas (LCCP)	119

Lista de símbolos

a	Eficiência radiativa	$[\text{Wm}^{-2} \text{ kg}^{-1}]$
A	Área	$[\text{m}^2]$
c_p	Calor específico a pressão constante	$[-]$
COP	Coeficiente de desempenho	$[-]$
D	Diâmetro	$[\text{m}]$
dt	Diferença de tempo	$[\text{anos}]$
FC	Fator de carga	$[-]$
ED	Efeito Direto	$[\text{kg}_{\text{CO}_2}]$
E	Consumo de energia	$[\text{kWh}]$
EI	Efeito Indireto	$[\text{kg}_{\text{CO}_2}]$
$Erro$	Erro incorrido	$[-]$
$Fluido$	Mistura azeotrópica ou não-azeotrópica	$[-]$
FM	Fração de massa	$[-]$
FR	Emissão de CO_2 equiv. na fabricação do ref.	$[\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{Ref}}^{-1}]$
g	Aceleração da gravidade	$[\text{m s}^{-2}]$
GWP	Global Warming Potential	$[\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{Ref}}^{-1}]$
h	Entalpia específica	$[\text{kJ kg}^{-1}]$
H	Altura ou nível do refrigerante	$[\text{m}]$
$Hman$	Altura de pressão da bomba	$[\text{m}]$
$Incpt$	Intercepto com o eixo vertical	$[-]$
K	Constante do acessório	$[-]$
L	Comprimento	$[\text{m}]$
$LCCP$	Life Cycle Climate Performance	$[\text{kg}_{\text{CO}_2}]$
m	Massa	$[\text{kg}]$
\dot{m}	Vazão de massa	$[\text{kg s}^{-1}]$
NC	Número de cilindros	$[-]$
NH	Número de Horas	$[\text{h}]$
P	Pressão	$[\text{kPa}]$
q	Fluxo de calor específico	$[\text{kJ kg}^{-1}]$
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	$[\text{kW}]$
q''	Taxa de transferência de calor por área	$[\text{kW m}^{-2}]$
$r(t)$	Função do tempo de vida do gás traço	$[-]$
R	Raio	$[\text{m}]$
CR	Conversão regional de energia	$[\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kW}^{-1}]$
RCR	Razão de carga de refrigerante	$[-]$
RD	Razão de densidades líquido/vapor	$[-]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
s	Entropia específica	$[\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$
S	Secção transversal	$[\text{m}^2]$
SA	Grau de superaquecimento	$[\text{°C}]$
slp	Pendente	$[-]$
SM	Grau de sub-resfriamento mecânico	$[\text{°C}]$
t	Tempo	$[\text{anos}]$
T	Temperatura	$[\text{°C}]$
$Taxa$	Taxa de rejeição de calor	$[\text{kW}]$

$TEWI$	Total Equivalent Warming Impact	[kg _{CO2}]
TH	Horizonte temporal	[anos]
THR	Rejeição total de calor no condensador	[kW]
TV	Tempo de vida	[anos]
V	Velocidade	[m s ⁻¹]
\dot{V}	Deslocamento volumétrico	[m ³ s ⁻¹]
\dot{W}	Potência	[kW]
x	Gás refrigerante analisado	[-]
$x(t)$	Função do tempo de vida da substância	[-]
X	Título	[-]
Z	Altitude	[m]

Símbolos gregos

β	Cte. para o cálculo da massa de refrigerante	[%]
δ	Fração de fluxo de calor	[%]
ΔP	Diferença de pressão	[kPa]
ΔT	Diferença de temperatura	[°C]
η	Eficiência	[-]
f	Fator de atrito	[-]
ρ	Densidade	[kg m ⁻³]
ϕ	Porcentagem de vazamento	[%]
ϑ	Viscosidade dinâmica	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]

Subscritos

b	Relativo à bomba
bal	Expositor frigorífico
$Bolha$	Ponto de bolha
BT	Baixa temperatura
CD	Condensador
$Comp$	Compressor
$Cond, COND$	Condensador ou condensação
des	Descarga
e	Entrada
EQ	Condição equivalente
ES	Específico
$Evap, EVAP$	Evaporador ou evaporação
f	Fluido
G	Global
$glide$	Temperatura de glide
IHX	Trocador de calor intermediário.
IN	Entrada
ini	Inicial
iso	Isentrópica
liq	Líquido
$linhas$	Linha de líquido ou vapor

<i>man</i>	Manifold ou distribuidor
<i>ME</i>	Temperatura ótima de evaporação
<i>MED</i>	Média
<i>MC</i>	Temperatura ótima de condensação
<i>MT</i>	Meia Temperatura
<i>novo</i>	Variável nova
<i>Orvalho</i>	Ponto de orvalho
<i>OUT</i>	Saída
<i>P</i>	Pistão
<i>r</i>	Relativo ao gás traço (CO ₂)
<i>R</i>	Condição real
<i>REF</i>	Refrigerante
<i>REJ</i>	Rejeitado
<i>s</i>	Saída
<i>SM</i>	Sub-resfriamento mecânico
<i>SR</i>	Taxa de sub-resfriamento
<i>suc</i>	Sucção
<i>SUP</i>	Referente ao supermercado
<i>t</i>	De trabalho
<i>tc</i>	De trabalho crítico
<i>total</i>	Total de alguma soma aritmética
<i>Tr</i>	Tanque Reservatório
<i>tub</i>	Tubulação
<i>val, valv</i>	Válvula
<i>v. c.</i>	Volume de controle
<i>vap</i>	Vapor
<i>vaz</i>	Vazamento
<i>x</i>	Relativo a gás refrigerante analisado