



Paul Ortega Sotomayor

**Caracterização e Simulação de Compressores Alternativos
Utilizando Fluidos com Baixo Potencial de
Aquecimento Global**

Tese de Doutorado

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

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

Rio de Janeiro
Maio de 2013



Paul Ortega Sotomayor

**Caracterização e Simulação de Compressores Alternativos
Utilizando Fluidos com Baixo Potencial de
Aquecimento Global**

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

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Doutor Samuel Fortunato Yana Motta

Co-Orientador

Honeywell International Inc.

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega

Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET/RJ

Prof. Gisele Ribeiro Vieira

Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET/RJ

Doutor Frank Chaviano Pruzaesky

ARCADIS LOGOS S/A.

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de maio de 2013

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 na Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (Perú), possui mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio), com ênfase na simulação de sistemas e componentes de refrigeração e condicionamento de ar.

Ficha Catalográfica

Sotomayor, Paul Ortega

Caracterização e simulação de compressores alternativos utilizando fluidos com baixo potencial de aquecimento global / Paul Ortega Sotomayor ; orientador: José Alberto dos Reis Parise ; co-orientador: Samuel F. Yana Motta. – 2013.

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

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Compressores. 3. Automotivo. 4. Hermético. 5. Semi-hermético. 6. Fluidos refrigerantes. 7. Simulação. 8. Parâmetros característicos. 9. Baixo potencial de aquecimento global. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Motta, Samuel F. Yana. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A meus Pais, Abel e Lucia, que se doaram inteiros e renunciaram aos seus sonhos
para que, por muitas vezes, pudesse eu realizar os meus.

Agradecimentos

Ao CNPq e ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela ajuda financeira e oportunidade concedida em minha evolução profissional, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A meu orientador José Alberto do Reis Parise, 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.

A meu co-orientador Samuel F. Yana Motta e à Dr. Elizabet Vera Becerra, pela oportunidade concedida para realizar os testes experimentais no laboratório de refrigeração da Honeywell Inc. e pelo valioso conhecimento transmitido durante o desenvolvimento de minha pesquisa.

A Marlene, por tudo que passou ao meu lado e por ter encontrado forças para me apoiar incondicionalmente em todos os momentos necessários.

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

A meus amigos Elder Marino Mendoza, Luis Enrique Alva, Yipsi Roque, Alan da Silva Esteves pela amizade e pelos bons momentos compartilhados nestes anos.

Resumo

Sotomayor, Paul Ortega; Parise, José Alberto dos Reis; Motta, Samuel F. Yana. **Caracterização e Simulação de Compressores Alternativos Utilizando Fluidos com Baixo Potencial de Aquecimento Global**. Rio de Janeiro, 2013. 331p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho trata da caracterização e simulação de compressores alternativos dos tipos automotivo, hermético e semi-hermético, motivado pela necessidade de estudo de novos refrigerantes, com menor impacto ambiental, isto é, sem potencial de destruição da camada de ozônio e baixo potencial de efeito estufa. O estudo apresenta uma metodologia para a modelagem, mediante a qual, dependendo do tipo de compressor, este é dividido nos seguintes volumes de controle: mufla de sucção, câmara de sucção, cilindro de compressão, câmara de descarga, linha de descarga, motor elétrico, carcaça do compressor, massa metálica interna e gás escoando no interior da carcaça. Equações fundamentais de conservação, de troca de calor, de queda de pressão e de propriedades termodinâmicas do refrigerante são aplicadas a cada volume de controle. Buscando o desenvolvimento de modelos simples, porém, ainda capazes de identificar o desempenho do compressor operando com diferentes refrigerantes, optou-se pelo desenvolvimento de modelos semi-empíricos, determinando-se coeficientes empíricos, característicos do compressor e independentes do refrigerante ou das condições de operação. Foram efetuados ensaios calorimétricos normalizados em duas instalações laboratoriais existentes para os compressores hermético e semi-hermético. Para o compressor hermético foi utilizado o HFC-134a como referência e foram testados os refrigerantes HFO-1234yf e HFO-1234ze(E) e a mistura HDR-17. Para o compressor semi-hermético foi utilizada uma instalação de refrigeração comercial instrumentada do tipo ar-ar, operando com a mistura R404A (referência), tendo sido testados oito novos fluidos. Para o compressor automotivo foram utilizados dados experimentais do refrigerante HFO-1234yf, existentes na literatura. A caracterização dos compressores alternativos foi bem sucedida na medida em que os parâmetros empíricos determinados a partir de diferentes refrigerantes mostraram-se com valores suficientemente próximos. Nos testes experimentais foram identificados fluidos refrigerantes com desempenho

maior e baixo potencial de aquecimento global. Atingiu-se, com a modelagem, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de prever as condições de operação de compressores alternativos operando com novos refrigerantes, a partir do modelo baseado em parâmetros empíricos obtidos de testes experimentais com refrigerantes convencionais, de fácil obtenção. O método de gradiente reduzido generalizado (GRG) foi utilizado na solução do sistema de equações não lineares, para a caracterização dos compressores alternativos. O modelo de simulação foi desenvolvido na linguagem Fortran. As propriedades termodinâmicas dos fluidos refrigerantes foram obtidas pelo pacote computacional REFPROP (NIST Standard Reference Database 23, Version 8.0). Os valores previstos pela simulação apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

Palavras-chave

Compressores; Automotivo; Hermético; Semi-hermético; Fluidos refrigerantes; Simulação; Parâmetros característicos; Baixo Potencial de aquecimento global.

Abstract

Sotomayor, Paul Ortega; Parise, José Alberto dos Reis (Advisor); Motta, Samuel F. Yana (Co-Advisor). **Characterization and Simulation of Reciprocating Compressor Using Fluids with Low Global Warming Potential**. Rio de Janeiro, 2013. 331p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work shows a methodology for calculating the characteristic parameters of an open, a hermetic and a semi-hermetic reciprocating compressor. This study was motivated by the need to study new refrigerants with lower environmental impact with reduced global warming potential and zero ozone depletion potential. The compressor is divided in control volumes: suction muffler, suction chamber, compressor cylinder, discharge chamber, discharge line, electric motor, flowing gas through the compressor, compressor shell and inner metallic mass. Fundamental equations of conservation, heat exchange, pressure drop and thermophysical properties of the refrigerant are applied to each control volume. A semi-empirical model and standard calorimetric tests are used to obtain empirical parameters independent of refrigerant and operating conditions. For the hermetic compressor was used as reference the refrigerant HFC-134a and tested refrigerants HFO-1234yf, HFO-1234ze(E) and a mixture HDR-17. For the semi-hermetic compressor, an instrumented commercial refrigeration system operating with the mixture R404A was used as reference. In this system eight new fluids have been tested. For the automotive compressor experimental data from refrigerant HFO-1234yf obtained from literature were used. The characterization of the reciprocating compressors has been successful because the empirical parameters determined from different refrigerants proved to have sufficiently close values. A computational tool, able to predict the operating conditions of reciprocating compressors (open automotive, hermetic and semihermetic), working with new and untested refrigerants, was developed from the simulation models. The generalized reduced gradient (GRG) method was implemented in order to obtain a numerical solution for the characteristic parameters and the

simulation computer program was developed in FORTRAN. Refrigerant properties were calculated using the software REFPROP version 8.0, developed by NIST, U.S.A.

Keywords

Compressor; Automotive; Hermetic; Semi-hermetic; Refrigerants; Simulation; Characteristic parameters; Low global warming potential.

Sumário

1 Introdução	40
1.1. Objetivos	41
1.2. Fluidos Refrigerantes	42
1.3. Compressores utilizados em refrigeração	44
1.4. Modelos de simulação para compressores alternativos	47
1.5. Justificativa e contextualização	48
1.6. Organização do trabalho	49
2 Compressor Automotivo	51
2.1. Introdução	51
2.2. Revisão bibliográfica	53
2.3. Modelo Matemático	56
2.3.1. Volumes de controle	56
2.3.2. Balanços de energia	57
2.3.3. Equações de transferência de calor	59
2.3.4. Equações de queda de pressão	61
2.3.5. Eficiências mecânica, volumétrica e isentrópica.	63
2.4. Dados experimentais	64
2.5. Método de solução	65
2.5.1. Cálculo dos parâmetros característicos	65
2.5.2. Simulação	70
2.6. Resultados	74
2.6.1. Caracterização do compressor automotivo	74
2.6.2. Validação do modelo de simulação	77
2.6.2.1. Compressor automotivo utilizando o fluido R134a	78
2.6.2.2. Compressor automotivo utilizando o fluido R1234yf	80
2.7. Conclusões	82
3 Compressor Hermético	83
3.1. Introdução	83

3.2. Revisão bibliográfica	86
3.3. Modelo matemático	90
3.3.1. Volumes de controle	90
3.3.2. Balanço de energia	91
3.3.3. Equações de transferência de calor	99
3.3.4. Equações de queda de pressão	103
3.3.5. Eficiências volumétrica e isentrópica	105
3.4. Exergia	106
3.4.1. Balanço de exergia	107
3.5. Aparato Experimental	112
3.5.1. Descrição do calorímetro experimental	112
3.5.2. Instrumentação	115
3.5.3. Compressor hermético	116
3.5.4. Procedimento dos testes experimentais	117
3.6. Método de solução	119
3.6.1. Cálculo dos parâmetros característicos.	119
3.6.2. Simulação	126
3.7. Resultados	130
3.7.1. Testes experimentais calorimétricos	130
3.7.2. Caracterização do compressor hermético	137
3.7.3. Validação do modelo de simulação	141
3.7.3.1. Compressor hermético utilizando o fluido R134a	142
3.7.3.2. Compressor hermético utilizando o fluido R1234yf	145
3.7.3.3. Compressor hermético utilizando o fluido R1234ze(E)	148
3.7.3.4. Compressor hermético utilizando a mistura HDR-17	150
3.7.4. Análise de exergética	153
3.7.4.1. Análise exergética dos volumes de controle do compressor hermético	154
3.8. Conclusões	158
 4 Compressor Semi-hermético	 161
4.1. Introdução	161
4.2. Revisão bibliográfica	162

4.3. Modelo matemático	164
4.3.1. Volumes de controle	164
4.3.2. Balanço de energia	165
4.3.3. Equações de transferência de calor	171
4.3.4. Equações de queda de pressão	173
4.3.5. Eficiências volumétrica e isentrópica	174
4.4. Exergia	175
4.4.1. Balanço de exergia	175
4.5. Aparato experimental	179
4.5.1. Descrição do sistema de refrigeração	179
4.5.2. Instrumentação	183
4.5.3. Especificações dos compressores semi-herméticos	184
4.5.4. Procedimento dos testes experimentais	185
4.6. Método de solução	187
4.6.1. Cálculo dos parâmetros característicos	187
4.6.2. Simulação	193
4.7. Resultados	197
4.7.1. Resultados experimentais	198
4.7.1.1. Compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	198
4.7.1.2. Compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	203
4.7.1.3. Compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis.	208
4.7.1.4. Compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis	213
4.7.2. Caracterização dos compressores semi-herméticos	218
4.7.2.1. Compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura	218
4.7.2.2. Compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura	221
4.7.3. Validação do modelo de simulação para compressores semi-herméticos.	224

4.7.3.1. Validação do modelo de simulação de compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	225
4.7.3.2. Validação do modelo de simulação de compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	240
4.7.3.3. Validação do modelo de simulação de compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis.	252
4.7.3.4. Validação do modelo de simulação de compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis.	259
4.7.4. Análise exérgica	270
4.7.4.1. Destruição da exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	270
4.7.4.2. Destruição da exergia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes não inflamáveis.	275
4.7.4.3. Destruição da exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis.	280
4.7.4.4. Destruição da exergia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos refrigerantes inflamáveis.	284
4.8. Conclusões	288
5 Conclusões	291
5.1. Recomendações para trabalhos futuros	292
6 Referências Bibliográficas	293
APÊNDICE A	304
A1 Método de gradiente reduzido generalizado (GRG)	304

A2 Incertezas nos modelos de simulação de compressores alternativos	308
A2.1 Propagação de incertezas	308
A2.2 Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor automotivo	309
A2.3 Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor hermético	318
A2.4 Propagação de incertezas no modelo de simulação do compressor semi-hermético	325

Lista de figuras

Figura 1.1 – Classificação de compressores de refrigeração (Eckhard, 2010).	45
Figura 1.2 – Compressores alternativos: a) Aberto automotivo, b) Hermético, c) Semi-hermético.	46
Figura 1.3 – Diagrama do ciclo de compressão a) teórico, b) real (Dossat, 2004).	47
Figura 2.1 – Sistema condicionador de ar automotivo (Hulsey, 2004).	51
Figura 2.2 – Compressor tipo swash plate (DENSO, 2006).	52
Figura 2.3 – Volumes de controle do compressor tipo swash plate.	56
Figura 2.4 – Volume de controle global do compressor.	57
Figura 2.5 – Volume de controle na sucção.	58
Figura 2.6 – Volume de controle do cilindro de compressão.	58
Figura 2.7 – Volume de controle da linha de descarga.	59
Figura 2.8 – Diagrama de fluxo para o cálculo dos parâmetros do compressor automotivo.	70
Figura 2.9 – Diagrama de fluxo do modelo de simulação do compressor automotivo.	73
Figura 2.10 – Eficiência volumétrica em função da relação de compressão para o fluido R134a.	75
Figura 2.11 – Eficiência isentrópica em função da relação de compressão para o fluido R134a.	76
Figura 2.12 – Comparação da eficiência volumétrica no cilindro de compressão entre os fluidos R134a e R1234yf.	76
Figura 2.13 – Comparação da eficiência isentrópica no cilindro de compressão entre os fluidos R134a e R1234yf.	77
Figura 2.14 – Erro relativo da previsão de temperatura na descarga (R134a).	79
Figura 2.15 – Erro relativo da previsão da vazão mássica do refrigerante R134a.	79
Figura 2.16 – Erro relativo da previsão de temperatura na	

descarga (R1234yf).	80
Figura 2.17 – Erro relativo da previsão de vazão mássica do refrigerante R1234yf.	81
Figura 3.1- Principais componentes do compressor hermético alternativo.	84
Figura 3.2 – Distribuição dos volumes de controle do compressor hermético.	90
Figura 3.3 – Esquema do volume global do compressor hermético.	91
Figura 3.4 – Volume de controle do gás escoando no interior da carcaça do compressor hermético.	92
Figura 3.5 – Volume de controle da distribuição do gás no interior da carcaça, compressor hermético.	93
Figura 3.6 – Volume de controle da mufla de sucção.do compressor hermético.	94
Figura 3.7 – Volume de controle da câmara de sucção do compressor hermético.	95
Figura 3.8 – Volume de controle do cilindro de compressão, compressor hermético	95
Figura 3.9 – Volume de controle do motor elétrico do compressor hermético	96
Figura 3.10 – Volume de controle da câmara de descarga do compressor hermético.	97
Figura 3.11 – Volume de controle da linha de descarga.do compressor hermético.	98
Figura 3.12 – Volume de controle do bloco metálico, compressor hermético.	98
Figura 3.13 – Balanço de exergia no compressor hermético.	107
Figura 3.14 – Balanço de exergia da mufla de sucção no compressor hermético.	108
Figura 3.15 – Balanço de exergia da câmara de sucção no compressor hermético.	108
Figura 3.16 – Balanço de exergia do cilindro de compressão no compressor hermético.	109

Figura 3.17 – Balanço de exergia do motor elétrico no compressor hermético.	110
Figura 3.18 – Balanço de exergia do eixo no motor elétrico no compressor hermético.	110
Figura 3.19 – Balanço de exergia da câmara de descarga no compressor hermético.	111
Figura 3.20 – Balanço de exergia da linha de descarga no compressor hermético.	111
Figura 3.21 – Esquema do calorímetro e seus componentes.	113
Figura 3.22 – Compartimento para testes experimentais.	114
Figura 3.23 – Painel de controle do calorímetro.	116
Figura 3.24 – Compressor hermético Embraco testado a) aberto com todos componentes b) vista geral.	116
Figura 3.25 – Fluxograma para o cálculo dos parâmetros característicos de queda de pressão e troca de calor.	125
Figura 3.26 – Fluxograma do modelo de simulação do compressor hermético.	129
Figura 3.27 – Comparação da capacidade de refrigeração relativa (referência R134a) do compressor hermético. Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	131
Figura 3.28 – Comparação relativa (referência R134a) da vazão mássica dos fluidos. Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	131
Figura 3.29 – Comparação do consumo de energia (referência R134a). Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	132
Figura 3.30 – Comparação da temperatura na descarga (referência R134a). Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	133
Figura 3.31 – Comparação da eficiência volumétrica (referência R134a). Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	134
Figura 3.32 – Comparação da eficiência isentrópica	

(referência R134a). Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	135
Figura 3.33 – Comparação do coeficiente de performance relativa (COP) do compressor hermético (referência R134a). Abcissa: temperaturas de condensação e evaporação.	136
Figura 3.34 – Eficiência volumétrica em função da razão de compressão. Função obtida com pontos do R134a.	138
Figura 3.35 – Eficiência isentrópica em função da vazão mássica do refrigerante. Função obtida com pontos do R134a.	139
Figura 3.36 – Consumo de energia em função da potência de compressão. Função obtida com pontos do R134a.	139
Figura 3.37 – Taxa de transferência de calor da carcaça do compressor em função da diferença de temperatura entre o meio ambiente e a temperatura da carcaça. Função obtida com pontos do R134a.	140
Figura 3.38 – Erro relativo da temperatura de descarga (R134a), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na abcissa no topo.	142
Figura 3.39 – Erro relativo da vazão mássica do refrigerante R134a, para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na abcissa no topo.	143
Figura 3.40 – Erro relativo do consumo de energia do compressor hermético (R134a), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na abcissa no topo.	143
Figura 3.41 – Erro relativo da temperatura de carcaça do compressor (R134a), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na abcissa no topo.	144
Figura 3.42 – Erro relativo da temperatura de descarga (R1234yf), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na abcissa no topo.	145
Figura 3.43 – Erro relativo da vazão mássica do refrigerante R1234yf, para condições de operação (T_{cond} / T_{evap}) disposta na	

abscissa no topo.	146
Figura 3.44 – Erro relativo do consumo de energia do compressor hermético (R1234yf), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
disposta na abscissa no topo.	147
Figura 3.45 – Erro relativo da temperatura de carcaça do compressor (R1234yf), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
disposta na abscissa no topo.	147
Figura 3.46 – Erro relativo da temperatura de descarga R1234ze(E), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
disposta na abscissa no topo.	148
Figura 3.47 – Erro relativo da vazão mássica do refrigerante R1234ze(E), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
disposta na abscissa no topo.	149
Figura 3.48 – Erro relativo do consumo de energia do compressor hermético R1234ze(E), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
dispostas na abscissa no topo.	149
Figura 3.49 – Erro relativo da temperatura de carcaça do compressor R1234ze(E), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
disposta na abscissa no topo.	150
Figura 3.50 – Erro relativo da temperatura de descarga (HDR-17), para condições de operação (T_{cond} / T_{evap})	
dispostas na abscissa no topo.	151
Figura 3.51 – Erro relativo da vazão mássica do refrigerante HDR-17.	151
Figura 3.52 – Erro relativo do consumo de energia do compressor hermético (HDR-17).	152
Figura 3.53 – Erro relativo da temperatura de carcaça do compressor (HDR-17).	152
Figura 3.54 – Comparação das irreversibilidades no compressor hermético com diferentes fluidos refrigerantes.	153
Figura 3.55 – Diagrama de Grassmann para o compressor hermético utilizando o fluido refrigerante R134a.	155

Figura 3.56 – Comparação das irreversibilidades do compressor hermético utilizando diferentes fluidos refrigerantes.	156
Figura 3.57 – Diagrama de Grassmann do processo de compressão do fluido R134a no compressor hermético para a condição de operação, $P_{suc} = 243,14 \text{ kPa}$; $T_{suc} = 32,29^\circ\text{C}$; $P_{dis} = 1163,11 \text{ kPa}$.	157
Figura 3.58 – Comparação da exergia destruída nos componentes do compressor hermético utilizando diferentes fluidos refrigerantes.	158
Figura 4.1 – Compressor semi-hermético (Bitzer, 2010)	161
Figura 4.2 - Volumes de controle do compressor semi-hermético.	164
Figura 4.3 – Volume de controle global do compressor semi-hermético.	165
Figura 4.4 – Volume de controle do gás escoando no interior da carcaça do compressor semi-hermético.	166
Figura 4.5 – Volume de controle da distribuição do gás no interior da carcaça do compressor semi-hermético	167
Figura 4.6 – Volume de controle da câmara de sucção do compressor semi-hermético.	168
Figura 4.7 – Volume de controle do cilindro de compressão do compressor semi-hermético.	169
Figura 4.8 – Volume de controle do motor elétrico do compressor semi-hermético.	169
Figura 4.9 – Volume de controle da câmara de descarga do compressor semi-hermético.	170
Figura 4.10 – Volume de controle do bloco metálico do compressor semi-hermético.	171
Figura 4.11 – Balanço de exergia no compressor semi-hermético.	175
Figura 4.12 – Balanço de exergia na câmara de sucção no compressor semi-hermético.	176
Figura 4.13 – Balanço de exergia no cilindro de compressão no compressor semi-hermético.	177
Figura 4.14 – Balanço de exergia no motor elétrico no compressor semi-hermético.	178
Figura 4.15 – Balanço de exergia do eixo no	

compressor semi-hermético.	178
Figura 4.16 – Balanço de exergia na câmara de descarga no compressor semi-hermético.	179
Figura 4.17 – Sistema de refrigeração comercial por compressão de vapor.	180
Figura 4.18 – Evaporador do tipo tubo e aleta de convecção forçada.	181
Figura 4.19 – Condensador do tipo tubo e aleta de convecção forçada.	181
Figura 4.20 – Compressores semi-herméticos: (a) baixa temperatura (b) média temperatura.	185
Figura 4.21 – Diagrama de fluxo do cálculo dos parâmetros característicos do compressor semi-hermético.	192
Figura 4.22 – Diagrama de fluxo da simulação do compressor semi-hermético.	196
Figura 4.23 – Capacidade de refrigeração do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	198
Figura 4.24 – Vazão mássica do fluido refrigerante no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	199
Figura 4.25 – Consumo de energia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	200
Figura 4.26 – Temperatura na descarga do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	200
Figura 4.27 – Eficiência volumétrica no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	201
Figura 4.28 – Eficiência isentrópica no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	202

Figura 4.29 - Coeficiente de performance no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	202
Figura 4.30 – Capacidade de refrigeração do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	204
Figura 4.31 – Vazão mássica do fluido refrigerante no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	204
Figura 4.32 – Consumo de energia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	205
Figura 4.33 – Temperatura na descarga do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	205
Figura 4.34 – Eficiência volumétrica no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	206
Figura 4.35 – Eficiência isentrópica no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	206
Figura 4.36 – Coeficiente de performance no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura. , operando com fluidos não inflamáveis.	207
Figura 4.37 – Capacidade de refrigeração do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	208
Figura 4.38 – Vazão mássica do fluido refrigerante no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	209
Figura 4.39 – Consumo de energia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	210

Figura 4.40 – Temperatura na descarga do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	210
Figura 4.41 – Eficiência volumétrica no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	211
Figura 4.42 – Eficiência isentrópica no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	211
Figura 4.43 – Coeficiente de performance no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura. , operando com fluidos inflamáveis.	212
Figura 4.44 – Capacidade de refrigeração do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	213
Figura 4.45 – Vazão mássica do fluido refrigerante no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	214
Figura 4.46 – Consumo de energia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	214
Figura 4.47 – Temperatura na descarga do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	215
Figura 4.48 – Eficiência volumétrica no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	216
Figura 4.49 – Eficiência isentrópica no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	216
Figura 4.50 – Coeficiente de performance no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura., operando com fluidos inflamáveis.	217

Figura 4.51 – Eficiência volumétrica em função da relação de compressão, para aplicações de baixa temperatura.	219
Figura 4.52 – Eficiência isentrópica em função da vazão mássica do fluido refrigerante, para aplicações de baixa temperatura.	219
Figura 4.53 – Consumo de energia em função da potência de compressão interna, para aplicações de baixa temperatura.	220
Figura 4.54 – Taxa de transferência de calor da carcaça do compressor em função da diferença de temperatura entre o meio ambiente e a temperatura da carcaça, para aplicações de baixa temperatura.	220
Figura 4.55 – Eficiência volumétrica em função da relação de compressão, para aplicações de média temperatura.	222
Figura 4.56 – Eficiência isentrópica em função da vazão mássica do fluido refrigerante, para aplicações de média temperatura.	222
Figura 4.57 – Consumo de energia em função da potência de compressão interna, para aplicações de média temperatura.	223
Figura 4.58 – Taxa de transferência de calor da carcaça do compressor em função da diferença de temperatura entre o meio ambiente e a temperatura da carcaça, para aplicações de média temperatura.	223
Figura 4.59 – Erro absoluto da temperatura na descarga (R404A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	225
Figura 4.60 – Erro relativo da vazão mássica (R404A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	226
Figura 4.61 – Erro relativo do consumo de energia (R404A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	226
Figura 4.62 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (R404A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	227
Figura 4.63 – Erro relativo da temperatura na descarga (LT), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	227
Figura 4.64 – Erro relativo da vazão mássica (LT), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	228
Figura 4.65 – Erro relativo do consumo de energia (LT), para	

aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	228
Figura 4.66 – Erro relativo da temperatura da carcaça (LT), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	229
Figura 4.67 – Erro relativo da temperatura na descarga (R407A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	229
Figura 4.68 – Erro relativo da vazão mássica (R407A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	230
Figura 4.69 – Erro relativo do consumo de energia (R407A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	230
Figura 4.70 – Erro relativo da temperatura da carcaça (R407A), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	231
Figura 4.71 – Erro relativo da temperatura na descarga (HDR-20), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	231
Figura 4.72 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-20), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	232
Figura 4.73 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-20), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	232
Figura 4.74 – Erro relativo da temperatura da carcaça (HDR-20), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	233
Figura 4.75 – Erro relativo da temperatura na descarga (HDR-21), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	233
Figura 4.76 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-21), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	234
Figura 4.77 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-21), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	234
Figura 4.78 – Erro relativo da temperatura da carcaça (HDR-21), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	235
Figura 4.79 – Erro relativo na temperatura na descarga (HDR-23), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	235
Figura 4.80 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-23), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	236
Figura 4.81 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-23), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	236

Figura 4.82 – Erro relativo da temperatura da carcaça (HDR-23), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	237
Figura 4.83 – Erro relativo na temperatura na descarga (R407E), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	237
Figura 4.84 – Erro relativo da vazão mássica (R407E), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	238
Figura 4.85 – Erro relativo do consumo de energia (R407E), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	238
Figura 4.86 – Erro relativo da temperatura da carcaça (R407E), para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	239
Figura 4.87 – Erro absoluto da temperatura na descarga (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	240
Figura 4.88 – Erro relativo da vazão mássica (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	240
Figura 4.89 – Erro relativo do consumo de energia (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	241
Figura 4.90 – Erro absoluto na temperatura da carcaça (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	241
Figura 4.91 – Erro absoluto da temperatura na descarga (R407A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	242
Figura 4.92 – Erro relativo da vazão mássica (R407A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	242
Figura 4.93 – Erro relativo do consumo de energia (R407A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	243
Figura 4.94 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (R407A), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	243
Figura 4.95 – Erro absoluto na temperatura na descarga (LT), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	244
Figura 4.96 – Erro relativo da vazão mássica (LT), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	244
Figura 4.97 – Erro relativo do consumo de energia (LT), para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	245
Figura 4.98 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (LT),	

para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	245
Figura 4.99 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-20),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	246
Figura 4.100 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-20),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	246
Figura 4.101 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-20),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	247
Figura 4.102 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-20),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	247
Figura 4.103 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-21),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	248
Figura 4.104 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-21),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	248
Figura 4.105 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-21),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	249
Figura 4.106 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-21),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	249
Figura 4.107 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-23),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	250
Figura 4.108 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-23),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	250
Figura 4.109 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-23),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	251
Figura 4.110 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-23),	
para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	251
Figura 4.111 – Erro absoluto da temperatura na descarga (R404A),	
para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	253
Figura 4.112 – Erro relativo da vazão mássica (R404A),	
para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	253
Figura 4.113 – Erro relativo do consumo de energia (R404A),	
para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	254
Figura 4.114 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (R404A),	
para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	254

Figura 4.115 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-36), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	255
Figura 4.116 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-36), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	255
Figura 4.117 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-36), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	256
Figura 4.118 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-36), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	256
Figura 4.119 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-47), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	257
Figura 4.120 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-47), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	257
Figura 4.121 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-47), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	258
Figura 4.122 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-47), para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	258
Figura 4.123 – Erro absoluto da temperatura na descarga (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	259
Figura 4.124 – Erro relativo da vazão mássica (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	260
Figura 4.125 – Erro relativo do consumo de energia (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	260
Figura 4.126 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (R404A), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	261
Figura 4.127 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-21), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	261
Figura 4.128 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-21), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	262
Figura 4.129 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-22), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	262
Figura 4.130 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-21), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	263
Figura 4.131 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-47),	

para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	263
Figura 4.132 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-47), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	264
Figura 4.133 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-47), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	264
Figura 4.134 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-47), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	265
Figura 4.135 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-23), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	265
Figura 4.136 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-23), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	266
Figura 4.137 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-23), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	266
Figura 4.138 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-23), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	267
Figura 4.139 – Erro absoluto da temperatura na descarga (HDR-36), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	267
Figura 4.140 – Erro relativo da vazão mássica (HDR-36), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	268
Figura 4.141 – Erro relativo do consumo de energia (HDR-36), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	268
Figura 4.142 – Erro absoluto da temperatura da carcaça (HDR-36), para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	269
Figura 4.143 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	270
Figura 4.144 – Diagrama de Grassmann do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluido R404A (não inflamáveis), para a condição de operação 24°C/-18°C.	273
Figura 4.145 – Diagrama de Grassmann do processador de compressão para aplicações de baixa temperatura, utilizando o fluido refrigerante R404A (não inflamáveis),	

para a condição de operação 24°C/-18°C.	274
Figura 4.146 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	275
Figura 4.147 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	276
Figura 4.148 – Diagrama de Grassmann do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluido R404A (não inflamáveis), para a condição de operação 27°C/2°C.	278
Figura 4.149 – Diagrama de Grassmann do processo de compressão para aplicações de média temperatura, utilizando o fluido refrigerante R404A (não inflamáveis), para a condição de operação 27°C/2°C.	279
Figura 4.150 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	280
Figura 4.151 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	281
Figura 4.152 – Diagrama de Grassmann do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluido R404A (inflamáveis), para a condição de operação 35°C/-18°C.	282
Figura 4.153 – Diagrama de Grassmann do processo de compressão para aplicações de baixa temperatura, utilizando o fluido refrigerante R404A (não inflamáveis), para a condição de operação 35°C/-18°C.	283
Figura 4.154 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	284
Figura 4.155 – Destruição de exergia no compressor	

semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	285
Figura 4.156 – Diagrama de Grassmann do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluido R404A (inflamáveis), para a condição de operação 27°C/2°C.	286
Figura 4.157 – Diagrama de Grassmann do processo de compressão para aplicações de média temperatura, utilizando o fluido refrigerante R404A (inflamáveis), para a condição de operação 27°C/2°C.	287
Figura 4.158 – Destruição de exergia no compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, fluidos inflamáveis.	288
Figura A2.1 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R134a.	316
Figura A2.2 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R1234yf.	316
Figura A2.3 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R134a.	317
Figura A2.4 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor automotivo, operando com o fluido R1234yf.	317
Figura A2.5 – Incertezas da vazão mássica obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.	323
Figura A2.6 – Incertezas da temperatura na descarga obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.	323
Figura A2.7 – Incertezas do consumo de energia obtido pelo modelo de simulação para o compressor hermético, operando com o fluido R134a.	324

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Classificação dos fluidos refrigerantes de acordo com a sua composição (Hundy et al., 2008).	43
Tabela 1.2 – Substituição de fluidos refrigerantes em atendimento ao Protocolo de Montreal (CETESB, 2001).	43
Tabela 3.1 – Classificação do compressor hermético pela faixa da temperatura de evaporação (Embraco, 2009)	84
Tabela 3.2 – Instrumentos de medição do calorímetro.	115
Tabela 3.3 – Características técnica do compressor hermético (Embraco) modelo FU130HAX.	117
Tabela 3.4 – Matriz das grandezas medidas em testes experimentais para validar o desempenho do compressor hermético modelo FU130HAX	118
Tabela 3.5 – Comparação dos principais parâmetros dos fluidos refrigerantes utilizados nos testes experimentais.	136
Tabela 3.6 – Parâmetros característicos de troca de calor.	137
Tabela 3.7 – Parâmetros característicos de queda de pressão.	137
Tabela 3.8 – Dados de entrada no modelo de simulação para à análise exergética.	154
Tabela 3.9 – Resultados do balanço de exergia global para o compressor hermético.	154
Tabela – 4.1 Especificações da válvula TXV.	182
Tabela – 4.2 Especificações da válvula EEV.	182
Tabela 4.3 – Instrumentação do sistema de refrigeração.	184
Tabela 4.4 – Especificações dos compressores semi-herméticos.	184
Tabela 4.5 – Temperatura da câmara frigorífica e de ar externo para aplicações de baixa temperatura.	185
Tabela 4.6 – Temperatura da câmara frigorífica e de ar externo para aplicações de média temperatura.	186
Tabela 4.7 – Fluidos refrigerantes e misturas para aplicações	

de baixa e média temperatura.	197
Tabela 4.8 – Comparação dos principais parâmetros de desempenho do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	203
Tabela 4.9 – Comparação dos principais parâmetros de desempenho do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	208
Tabela 4.10 – Comparação dos principais parâmetros de desempenho do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	212
Tabela 4.11 – Comparação dos principais parâmetros de desempenho do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	217
Tabela 4.12 – Parâmetros característicos do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura.	218
Tabela 4.13 – Parâmetros característicos do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura.	221
Tabela 4.14 – Erro relativo na simulação do compressor semi-hermético aplicações de baixa temperatura, fluidos não inflamáveis.	239
Tabela 4.15 – Erro relativo na simulação do compressor semi-hermético aplicações de média temperatura, fluidos não inflamáveis.	252
Tabela 4.16 – Erro relativo na simulação do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	259
Tabela 4.17 – Erro relativo na simulação do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, fluidos inflamáveis.	269
Tabela 4.18 – Condição de operação do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	271
Tabela 4.19 – Análise exergética do compressor semi-hermético	

para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	272
Tabela 4.20 – Condições de operação do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	276
Tabela 4.21 – Análise exérgica do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis.	277
Tabela 4.22 – Condições de operação do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	281
Tabela 4.23 – Análise exérgica do compressor semi-hermético para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	281
Tabela 4.24 – Condições de operação do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	285
Tabela 4.25 – Análise exérgica do compressor semi-hermético para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis.	286
Tabela A2.1 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes experimentais do compressor automotivo	313
Tabela A2.2 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor automotivo operando com R134a	314
Tabela A2.3 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor automotivo operando com R1234yf	314
Tabela A2.4 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga do compressor automotivo operando com R134a	315
Tabela A2.5 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga do compressor automotivo operando com R1234yf	315
Tabela A2.6 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes	

experimentais para o compressor hermético	321
Tabela A2.7 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica do compressor hermético operando com R134a	321
Tabela A2.8 – Propagação de incertezas da temperatura da descarga do compressor hermético operando com R134a	322
Tabela A2.9 – Propagação de incertezas do consumo de energia do compressor hermético operando com R134a	322
Tabela A2.10 – Incertezas dos instrumentos utilizados nos testes experimentais para o compressor semi-hermético	327
Tabela A2.11 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis	327
Tabela A2.12 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de média temperatura, operando com não inflamáveis	328
Tabela A2.13 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis	328
Tabela A2.14 – Propagação de incertezas na medida da vazão mássica para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis	328
Tabela A2.15 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis	329
Tabela A2.16 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis	329
Tabela A2.17 – Propagação de incertezas da temperatura na descarga para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis	329
Tabela A2.18 – Propagação de incertezas na medida da temperatura na descarga para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis	330

Tabela A2.19 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos não inflamáveis	330
Tabela A2.20 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de média temperatura, operando com fluidos não inflamáveis	330
Tabela A2.21 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de baixa temperatura, operando com fluidos inflamáveis	331
Tabela A2.22 – Propagação de incertezas na medida do consumo de energia para aplicações de média temperatura, operando com fluidos inflamáveis	331

Lista de Símbolos

A	Área de transferência de calor	$[m^2]$
A_t	Área da seção transversal	$[m^2]$
a_0, a_1, a_2	Coeficientes da eficiência volumétrica	$[-]$
b_0, b_1, b_2	Coeficientes da eficiência isentrópica	$[-]$
C	Constante	$[-]$
CH	Parâmetro característico de troca de calor no compressor	$[m^{-0,2}]$
CP	Parâmetro característico de queda de pressão no compressor	$[m^{-4}]$
c_p	Calor específico	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$
D	Diâmetro	$[m]$
\dot{E}	Consumo de energia	$[kW]$
$E(^{\circ}C)$	Erro na Temperatura	$[^{\circ}C]$
$E(\%)$	Erro relativo	$[\%]$
f	Fator de atrito de Fanning	$[-]$
f_i, g_i	Funções	$[^{\circ}C]$
F_{obj}	Função objetivo	$[^{\circ}C]$
h	Entalpia específica	$[kJ.kg^{-1}]$
L	Comprimento	$[m]$
l_i	Limite inferior	$[-]$
\dot{m}_r	Vazão mássica	$[kg.s^{-1}]$
\dot{m}_{rx}	Vazão mássica que passa direto à mufla de sucção	$[kg.s^{-1}]$
\dot{m}_{rx}	Vazão mássica escoando no interior da carcaça	$[kg.s^{-1}]$
N	Velocidade angular de compressão	$[rps]$
Nu	Número de Nusselt	$[-]$
P	Pressão	$[kPa]$
P_o	Pressão de referência	$[kPa]$
\dot{P}_{eixo}	Potência de eixo	$[kW]$
\dot{P}_m	Potência de compressão	$[kW]$
Pr	Número de Prandtl	$[-]$
ΔP	Queda de Pressão	$[kPa]$
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	$[kW]$
\dot{Q}_{cp}	Capacidade frigorífica do compressor	$[kW]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
s	Entropia específica	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$
S_{ger}	Geração de entropia	$[kW.K^{-1}]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$

T_o	Temperatura de referência	[°C]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
T_{cond}	Temperatura de condensação	[°C]
T_{evap}	Temperatura de evaporação	[°C]
T_{ms}	Temperatura média do fluido na sucção	[°C]
T_{suc}	Temperatura na sucção	[°C]
T_w	Temperatura da parede do bloco metálico	[°C]
$T_{w,m}$	Temperatura da parede motor elétrico	[°C]
T_{wt}	Temperatura da parede da linha de descarga	[°C]
T_{md}	Temperatura média do fluido na descarga	[°C]
u_i	Limite superior	[-]
V_d	Volume de deslocamento do compressor	[m ³]
\bar{x}	Vetor de parâmetros característicos	[-]
X_{calor}	Exergia transferida pelo calor	[kJ.kg ⁻¹]
X_{des}	Exergia destruída	[kJ.kg ⁻¹]
X_{massa}	Exergia transferida pela massa	[kJ.kg ⁻¹]
$X_{trabalho}$	Exergia transferida por trabalho	[kJ.kg ⁻¹]

Símbolos Gregos

α	Coeficiente de transferência de calor	[kW.m ⁻² .K ⁻¹]
γ	Constante de temperatura	[-]
δ	Fator de configuração de mufla	[-]
η	Eficiência	[-]
μ	Viscosidade	[Pa.s]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ψ	Fluxo de exergia	[kJ.kg ⁻¹]

Subscritos

a	Quantidade de movimento
ca	Carcaça
cal	Calculado
cc	Cilindro de compressão
cs	Câmara de sucção

<i>cd</i>	Câmara de descarga
<i>comp</i>	Compressor
<i>e</i>	Elétrica
<i>eixo</i>	Eixo
<i>exp</i>	Experimental
<i>f</i>	Atrito
<i>g</i>	Gravidade
<i>i</i>	Condição de operação
<i>ld</i>	Linha de descarga
<i>m</i>	Mecânica
<i>me</i>	Motor elétrico
<i>num</i>	Numérico
<i>pm</i>	Perdas mecânicas
<i>pe</i>	Perdas elétricas
<i>v</i>	Volumétrica
<i>w</i>	Parede do bloco metálico
<i>y</i>	Gás escoando no interior da carcaça
1,2,...,7	Pontos correspondentes aos estados termodinâmicos