

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Guilherme Loyola França de Vasconcellos

**AVALIAÇÃO ENÉRGICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO-DIFUSÃO ACIONADO PELOS GASES DE EXAUSTÃO DE UM
MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA**

Belo Horizonte

2019

Guilherme Loyola França de Vasconcellos

**AVALIAÇÃO ENÉRGICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO-DIFUSÃO ACIONADO PELOS GASES DE EXAUSTÃO DE UM
MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Cristiana Brasil Maia

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio de Moraes Hanriot

Belo Horizonte

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

V331a Vasconcellos, Guilherme Loyola França de
Avaliação energética de um sistema de refrigeração por absorção-difusão
acionado pelos gases de exaustão de um motor à combustão interna / Guilherme
Loyola França de Vasconcellos. Belo Horizonte, 2019.
193 f. : il.

Orientadora: Cristiana Brasil Maia
Coorientador: Sérgio de Moraes Hanriot
Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Motores de combustão interna. 2. Automóveis - Consumo de combustíveis.
3. Energia - Fontes alternativas. 4. Queima de gases. 5. Refrigeração. 6. Emissões
de veículos. 7. Motor diesel. I. Maia, Cristiana Brasil. II. Hanriot, Sérgio de
Moraes. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 629.113-843

Ficha catalográfica elaborada por Elizângela Ribeiro de Azevedo - CRB 6/3393

Guilherme Loyola França de Vasconcellos

**AVALIAÇÃO ENÉRGICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO-DIFUSÃO ACIONADO PELOS GASES DE EXAUSTÃO DE UM
MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas térmicos e fluidos

Dra. Cristiana Brasil Maia (Orientadora) – PUC Minas

Dr. Sérgio de Moraes Hanriot (Coorientador) – PUC Minas

Dr.-Ing. Pedro Paiva Brito (examinador interno – PUC Minas)

Dr. Márcio Fonte-Boa Cortez (examinador externo) – UFMG

Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri (examinador externo) – CEFET - MG

Dr. Matheus Pereira Porto (examinador externo) – UFMG

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho:

À professora orientadora Cristiana Brasil Maia pelo incentivo e acompanhamento durante a realização do projeto fomentando o interesse pela pesquisa e desenvolvimento científico na universidade, além de todo o suporte emocional.

Ao professor coorientador Sérgio de Moraes Hanriot que desde a Iniciação Científica orientou e auxiliou na busca pelo conhecimento. Estando sempre aberto a ajudar no crescimento profissional e pessoal.

Aos meus pais. A você pai, Marcos Vinicius de Vasconcellos (in memoriam), pelo amor, carinho e pela amizade que sempre me ajudaram no maior aprendizado de toda a vida. Serei sempre grato a você pela dedicação, carinho e pelo amor dados. Você sempre será o meu espelho de vida. A você mãe, Adriana Loyola França de Vasconcellos, pelo apoio e carinho incondicionais, como só uma mãe é capaz. Muito obrigado por estar comigo em todos os momentos, demonstrando o quão maravilhosa uma mãe pode ser.

Aos meus irmãos, Tatiana Loyola França de Vasconcellos e Marcos Vinicius de Vasconcellos Júnior, pelo grande aprendizado da vida, estaremos sempre juntos!

Aos meus avós, Miriam, Bernardo, João e Meiga. À minha bisavó Iolanda e a todos os meus familiares, inclusive ao meu irmão Marcos Paulo.

Aos meus amigos de Pós Graduação, iniciação científica e funcionários da PUC-Minas que contribuíram de diversas maneiras, inclusive, ajudando a tornar os estudos menos monótonos e mais divertidos. Um agradecimento em especial à Ana Carolina Rodrigues Teixeira, Janaína de Oliveira Castro e Silva, Cristiano Henrique Gonçalves de Brito, Felipe Mit, Matheus Queiroz, Vinicius Guerra, Alex de Oliveira, Valéria Gomes, ao professor Pedro Paiva Brito, ao Funcionário Lucas Winkler dentre outros.

À Laís Marino Brandão Pinto pelo suporte, compreensão e apoio durante o desenvolvimento da tese. Sem o seu auxílio e companhia nada disso teria sido possível. Agradeço por ter me ensinado que sempre podemos mais, me tornando uma pessoa melhor. Agradeço por todas as horas de diversão e carinho que me permitiram superar os duros momentos que a construção de uma tese proporciona. Você foi/é muito especial para mim.

A todos que de alguma forma contribuíram comigo nessa longa e árdua jornada meu muito obrigado. Agradeço também a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Nunca tenha certeza de nada, porque a sabedoria começa com a dúvida.”

Sigmund Freud

RESUMO

Devido ao crescimento da demanda global por energia e ao aumento da preocupação com o meio ambiente, fontes limpas e/ou renováveis de energia têm se tornado foco de diversos estudos. Entretanto, a utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia é, ainda, o meio mais difundido de suprir esta demanda. Nesse cenário, sistemas de refrigeração que utilizam fontes alternativas de energia, como é o caso dos sistemas de refrigeração por absorção voltaram a ter um papel de destaque em estudos termodinâmicos que envolvem cogeração, especialmente, quando se analisa do ponto de vista da recuperação da energia perdida na forma de calor nos diversos processos industriais existentes. O presente trabalho objetivou a análise experimental de um ciclo de refrigeração por absorção funcionando com o reaproveitamento da energia térmica proveniente dos gases de exaustão de um motor Diesel/Otto de um grupo motor-gerador e seu modelamento matemático numérico no programa EES. Para a realização do presente trabalho, testes experimentais foram feitos no laboratório de Motores da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais em três condições de montagem (termo resistor, GLP e gás de exaustão como fontes de energia do gerador). Para a realizar as trocas de calor entre a exaustão do grupo motor-gerador e o gerador do DARC um trocador de calor casco e tubos foi construído. O modelamento do ciclo de refrigeração por absorção difusão (DARC) foi realizado dividindo-se os componentes do sistema em volumes de controle, o que permitiu avaliar cada componente e a variação de propriedades pontualmente. Os resultados experimentais demonstraram que para o refrigerador em estudo, a temperatura ideal do gerador é de aproximadamente 180 °C. Os resultados de Coeficiente de Desempenho (COP) do refrigerador obtidos foram de 0,058 e 0,053, para o Diesel e o etanol, respectivamente, de 0,052 para a corrente alterada e de 0,0484 para o GLP. Na modelagem matemática, realizada em regime permanente, o COP encontrado foi de 0,05106 W. Conclui-se que o modelo proposto conseguiu avaliar os principais comportamentos físicos do DAR, e permitiu avaliar as propriedades termodinâmicas pontualmente, permitindo, por exemplo, prever valores de título durante a saturação, temperatura, pressão, vazão e fração de vazão. Entretanto, ainda é necessário melhorar a precisão do modelo com a adição de dados experimentais que possam validar propriedades como pressão e vazão em cada um dos componentes do sistema.

Palavras chave: Ciclo de Refrigeração por Absorção, Motor de combustão interna, Reaproveitamento dos gases de exaustão.

ABSTRACT

Due to growing global demand for energy and growing concern for the environment, clean and / or renewable sources of energy have become the focus of many researchs. However, the use of fossil fuels as source energy is still the most widespread means to provide this demand. In this scenario, cooling systems that use alternative energy sources, such as absorption refrigeration systems, have once again played a prominent role in thermodynamic studies involving cogeneration, especially when considering the point of view of energy recovery. The present work aimed at the experimental analysis of an absorption refrigeration cycle working with the reuse of the thermal energy from the exhaust gases of a Diesel / Otto engine and its numerical mathematical modeling in the EES software. For the accomplishment of the present work, the experimental tests were made in the Laboratory of Motors of the Pontifical Catholic University of Minas Gerais under three mounting conditions (thermoresistor, LPG and exhaust gas as generator power sources). A shell and tube heat exchanger was built to perform the heat exchanges between the DARC generator and the engine exhaust gases. The diffusion absorption refrigeration cycle (DARC) model was performed by dividing the system components into control volumes. This divisions allowed accomplish monitored of each component of the cycle and its variation of thermodynamics properties locals. The results shows that for the refrigerator under study, the ideal temperature of the generator was approximately 180 °C. The results of the refrigerator coefficient of performance (COP) were 0.058 and 0.053 for Diesel and ethanol, respectively, 0.052 for the tests of altered current and 0.0484 for the LPG. In the mathematical modeling, performed in steady state, a COP of 0.05106 W was found. This work concluded that, the analyzed model was executed using the main criteria of use of the DAR, and this allowed known some thermodynamics properties along the cycle, such as void fraction, quality variation during saturation, temperatures and the pressure drop of some components. However, it is still necessary to improve the precision of the model by adding experimental data that can validate properties such as pressure and mass flow rate in each components of the cycle.

Keywords: Absorption Refrigeration Cycle, Internal combustion engine, Exhaust gas reuse

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de refrigeração a vapor	37
Figura 2 – Esboço de um diagrama P-h para um SRCV	38
Figura 3 – Esboço de um diagrama T-s para um SRCV	38
Figura 4 – Absorção x Compressão a vapor.....	39
Figura 5 – ARS padrão	42
Figura 6 – Ciclo DAR.....	43
Figura 7 – Gráfico Temperatura x fração molar.....	45
Figura 8 – Ciclo Otto	46
Figura 9 – Diagrama Pv e TS ciclo Diesel	46
Figura 10 – Tecnologias conhecidas de recuperação de calor em MCI.....	58
Figura 11 – Refrigerador Norcold N305-3R	64
Figura 12 – Grupo Motor-Gerador	66
Figura 13 – Planejamento experimental	69
Figura 14 – Esquema da montagem do refrigerador com duto de exaustão.....	73
Figura 15 – Teste principal Diesel.....	76
Figura 16 – Teste após isolamento Diesel	76
Figura 17 – Interior do refrigerador.....	77
Figura 18 – Projeto em CAD Trocador de Calor	77
Figura 19 – Montagem experimental Trocador de Calor	78
Figura 20 – Fluxograma de um projeto de trocador de calor	81
Figura 21 – Fluxograma do programa trocador de calor	82
Figura 22 – Escoamento do lado do casco do trocador de calor	90
Figura 23 – Componentes simulados	92
Figura 24 – Fluxograma do Gerador	93
Figura 25 – Fluxograma do Retificador	97
Figura 26 – Rotina região de saturação do condensador	99
Figura 27 – Fluxograma do Condensador	105
Figura 28 – Fluxograma do tubo ‘U’	107
Figura 29 – Dimensões e direção da troca de calor no evaporador.....	108
Figura 30 – Região saturação evaporador	109
Figura 31 – Fluxograma do Evaporador.....	113
Figura 32 – Trocador de calor de soluções.....	114
Figura 33 – Fluxograma do trocador de calor soluções.....	115
Figura 34 – Gráficos de temperatura x tempo para cada componente em CA.....	118
Figura 35 – Temperaturas ambiente e fonte de calor x tempo em CA.....	119
Figura 36 – Gráficos de temperatura x tempo para cada componente GLP.....	120
Figura 37 – Fonte de Calor e Temperatura ambiente x tempo para o GLP.....	121
Figura 38 – Temperatura, vazão e consumo por carga para o ciclo Diesel.....	122
Figura 39 – Emissões medidas Diesel	125
Figura 40 – Medições indiretas Diesel	126
Figura 41 – Resultados experimentais para o Diesel com Carga Decrescente.....	127

Figura 42 – Resultados experimentais Diesel Carga Crescente.....	128
Figura 43 – Testes experimentais de 6 horas	129
Figura 44 – Dados do motor para diferentes razões de equivalência.....	130
Figura 45 – Temperatura, vazão e consumo por carga para o ciclo Otto	131
Figura 46 – Emissões medidas testes padrão x Moreira (2018)	133
Figura 47 – Emissões indiretas etanol.....	135
Figura 48 – Emissões medida Etanol.....	136
Figura 49 – Emissões indiretas Etanol.....	137
Figura 50 – Teste Otto carga variável	138
Figura 51 – Entrada e saída do gerador x Tempo	139
Figura 52 – Entrada do retificador x tempo	140
Figura 53 –Entrada e Saída do condensador x tempo	141
Figura 54 – Entrada e Saída do evaporador x tempo	142
Figura 55 – Coeficiente de Desempenho para cargas constantes	143
Figura 56 – Coeficiente de Desempenho dos demais ciclos	144
Figura 57 – Validação Numérica	146
Figura 58 – Resultados retificador.....	147
Figura 59 – Resultados do Condensador.....	148
Figura 60 – Resultados do Evaporador	149
Figura 61 – Resultados do Evaporador	151
Figura 62 – Coeficiente de desempenho x Calor Fornecido ao Gerador	152
Figura 63 – Taxa de Calor no evaporador e no Absorvedor por potência no gerador.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do refrigerador Norcold.....	64
Tabela 2 – Características do motor Diesel.....	65
Tabela 3 – Pontos de implementação dos termopares.....	71
Tabela 4 – Descrição da sequência de testes no grupo motor-gerador.....	74
Tabela 5 – Variação da carga durante os testes.....	75
Tabela 6 – Dados do condensador.....	98
Tabela 7– Dados do tubo U.....	106
Tabela 8 – Efetividades do evaporador.....	111
Tabela 9 – Resultados para o projeto do trocador de calor casco e tubos.....	145
Tabela 10 – Principais resultados do gerador.....	146
Tabela 11 – Melhores valores encontrados para a bomba de bolhas.....	154
Tabela 12 – Melhores valores encontrados para as simulações de solução forte e fraca.....	154
Tabela 13 – Vazão e temperatura para carga contínua Diesel.....	174
Tabela 14 – Vazão e temperatura para carga variável crescente Diesel.....	174
Tabela 15 – Vazão e temperatura para carga variável decrescente Diesel.....	175
Tabela 16 – Vazão e temperatura para carga variável decrescente Diesel.....	175
Tabela 17 – Vazão e temperatura para carga variável contínua Etanol.....	175
Tabela 18 – Vazão e temperatura para carga variável decrescente Etanol.....	176

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARS – Sistema de Refrigeração por Absorção

ASME-American Society of Mechanical Engineers

ASTM- American Society for Testing and Materials

CFC's - cloro-fluor-carbono

COP – Coeficiente de Desempenho

DAR – Refrigeração por Absorção Difusão

DARC – Ciclo de refrigeração por absorção difusão

EES –Engine Equation Solve

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

HFC's – Hidrofluorcarboneto

ISO - International Organization for Standardization

MCI – Motores de Combustão Interna

ORC - Ciclo Rankine Orgânico

SRA – Sistema de Refrigeração por Absorção

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Área suja de troca de calor	[m ²]
A_c	Área limpa de troca de calor	[m ²]
A	Área de troca de calor	[m ²]
A_0	Área efetiva de troca de calor	[m ²]
A_f	Área Frontal.	[m ²]
Bafflespace	Espaçamento entre as chicanas	[-]
Bo	Número de ebulição	[-]
$c_{p_{\text{exa}}}$	Calor específico a pressão constante da exaustão	[J/kg-K],
C_{air}	Capacidade calorífica do ar	[W/K]
C_{min}	Menor capacidade calorífica entre os fluidos de trabalho	[W/K]
$c_{p,q}$	Calor específico à pressão constante do fluido quente	[J/kg-K]
CL	Constante de cálculo de contagem de tubos	[-]
COP	Coefficiente de Desempenho	[-]
C_p	Calor específico a pressão constante	[J/kg-K]
$C_p,$	Calor específico à pressão constante.	[-]
Cr	Razão entre as taxas de capacidades caloríficas	[-]
d_{ext}	Diâmetro externo	[m]
$D_s \cdot$	Diâmetro do casco	[m]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
D_{etubo}	Diâmetro externo dos tubos	[m]
D_{itubo}	Diâmetro interno do tubo	[m]
$\frac{dE}{dt}$	Taxa de acúmulo de energia no volume de controle	[W]
E	Variação da tensão.	[V]
G_s	velocidade mássica do casco	[kg / (m ² ·s)]
G_{tp}	Velocidade mássica bifásica	[kg/m ² ·s]
g	gravidade	[m/s ²]

G	Velocidade mássica	[kg / (m ² ·s)]
h'_{fg}	Calor latente de vaporização modificado	[J/kg]
h_{fg}	Calor latente	[J/kg]
h_L	Coefficiente de transferência de calor da fase líquida	[W/(m ² ·K)]
H_{total}	Altura do tubo	[m]
h	Entalpia específica	[kJ/kg]
h	Coefficiente de troca de calor por convecção	[W/m ² ·K]
h_0	Coefficiente convectivo externo ao tubo	[W/(m ² ·K)]
k_{exa}	Condutividade térmica da exaustão	[W/m·K]
k_f	Condutividade térmica do fluido	[W/m·K]
K_f	Condutividade térmica do fluido	[W/(m·K)]
$K_{material}$	Condutividade térmica do material do tubo	[W/(m·K)]
L^*	Comprimento característico do escoamento	[m]
L	Comprimento do casco do trocador de calor	[m]
\dot{m}_q	Vazão mássica do fluido frio	[kg/s]
\dot{m}_e	Vazão mássica de entrada	[Kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássica de saída	[Kg/s]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
m	massa	[kg]
MM_i	Massa molar do componente i	[kg/kmol]
\overline{Nu}_H	Número de Nusselt baseado na altura	[-]
N_b	Número de chicanas	[-]
Nu_{casco}	Número de Nusselt do casco	[-]
n_p	Número de moles dos produtos da combustão	[-]
N_t	Número de tubos do trocador de calor	[-]
Nu	Número de Nusselt	[-]
Nu_D	Número de Nusselt baseado no diâmetro	[-]
NTU	Número de Unidades de Transferência de calor	[-]

P	Pressão estática.	[Pa]
P_{∞}	Pressão Estática na corrente livre.	[Pa]
Pe	Número de Peclet	[-]
PR	Relação de passes do tubo	[-]
Pr	Número de Prandtl	[-]
\dot{Q}_{evap}	Taxa de transferência de calor fornecida ao evaporador	[kJ/s]
$\dot{Q}_{gerador}$	Taxa de calor fornecida ao gerador	[W]
\dot{Q}	Taxa de calor	[W]
q_{in}	Título de entrada	[-]
q_{out}	Título de saída	[-]
Ra_L	Número de Rayleigh	[-]
Re_{eq}	Número de Reynolds bifásico	[-]
Re_f	Reynolds da fase líquida	[-]
Re_g	Reynolds da fase gasosa	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re	número de Reynolds	[-]
R_{ft}	Fator de deposição dos gases exaustão no tubo	[(m ² ·K)/W]
s	Entropia específica	[kJ/kg-K]
$T_{ebulição}$	Temperatura do vapor da mistura água e amônia	[K]
T_{enNH_4OH}	Temperatura de entrada da mistura amônia água, fluido frio	[K]
T_{intexa}	Temperatura de entrada da exaustão, fluido quente	[K]
T_{outexa}	Temperatura de saída da exaustão, fluido quente	[K]
$T_{saidaNH_4OH}$	Temperatura de saída da mistura amônia água, fluido frio	[K]
T_{sat}	Temperatura de saturação	[K]
T_{∞}	Temperatura do fluido	[K]
$T_{q,e}$	Temperatura do fluido quente na entrada	[K]
$T_{q,s}$	Temperatura do fluido quente na saída	[K]
t	Coordenada temporal no espaço.	[s]

t	Variável temporal de tempo	[s]
T	temperatura do corpo	[K]
T_{wall}	Temperatura da parede	[K]
U_c	Coefficiente global de transferência de calor limpo	[W/(m ² ·K)]
U_f	Coefficiente global de transferência de calor sujo	[W/(m ² ·K)]
U	Coefficiente global de transferência de calor	[W/(m ² ·K)]
$\frac{v_s^2}{2}$	Energia cinética específica na saída	[J/kg]
$\frac{v_e^2}{2}$	Energia cinética específica na entrada	[J/kg]
V_{tp}	Velocidade média do escoamento bifásico	[m/s]
v	Volume específico	[m ³ /kg]
VC	Número de volumes de controle	[-]
V	Velocidade média do escoamento	[m/s]
\dot{W}_{bomba}	Trabalho da bomba	[W]
$\dot{W}_{\text{compressor}}$	Trabalho líquido do compressor	[kW]
\tilde{x}_i	Fração molar do i-ésimo componente do gás de exaustão	[-]
X	Concentração de refrigerante na mistura	[-]
y_v	Concentração de amônia na fase vapor	[-]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

ρ_{tp}	Massa específica bifásica	[kg/m ³]
α_m	Difusividade térmica	[m ² /s]
λ	Razão de equivalência ar/combustível	[-]
ε	Efetividade do trocador de calor	[-]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
ϕ	Razão de equivalência combustível/ar	[-]
α_{rh}	Fração de vazio	[-]

$\Delta P_{\text{estatica}}$	Perda de pressão estática por metro	[Pa/m]
ΔP_{mom}	Perda de pressão de momento	[Pa]
$\Delta T_{\text{ambiente}}$	Diferença entre uma temperatura e a temperatura do ar ambiente	[K]
ΔT_m	Correção da média logarítmica	[K]
μ_{exa}	Viscosidade dinâmica da exaustão	[Pa s]
μ_l	Viscosidade da fase líquida	[Pa.s]
$\mu_{\text{NH}_3\text{f}}$	Viscosidade da mistura amônia água na fase líquida	[Pa.s]
ρ_l	Massa específica do fluido no estado líquido	[Kg/m ³]
σ_{TP}	Tensão superficial bifásica	[Pa]
$\Delta T_{\text{lm,cf}}$	Média logarítmica das temperaturas	[K]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	31
1.1 Justificativa	32
1.2 Objetivos.....	34
1.3 Estrutura do trabalho	35
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
2.1 Ciclo básico de refrigeração a vapor.....	36
2.2 Ciclo de refrigeração por absorção.....	39
2.2.1 DARC	42
2.2.2 Mistura amônia água	44
2.3 Motor de combustão interna	45
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	49
3.1 Ciclo de refrigeração por absorção.....	49
3.2 Utilização de gases de exaustão em DARC.....	56
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	63
4.1 Refrigerador e Grupo Motor-Gerador.....	63
4.2 Especificação e calibração dos instrumentos	66
4.2.1 Sensores de temperatura	66
4.2.2 Sensor de Pressão	67
4.2.3 Sensor de admissão de vazão mássica de ar	67
4.2.4 Medidor de Gases de exaustão	68
4.2.5 Sistema de aquisição de dados	69
4.3 Plano de ensaios experimentais	69
4.3.1 Testes com GLP	72
4.3.2 Testes com termo resistor	72
4.3.3 Testes com gases de exaustão Diesel e etanol.....	72
4.4 Trocador de Calor casco e tubos	77
5 Modelagem matemática.....	79
5.1 Hipóteses utilizadas	80
5.2 Projeto do trocador de calor.....	80
5.2.1 Trocador de calor casco e tubos	81
5.2.2 Método de Bell Delaware	89
5.3 Modelagem do ciclo de refrigeração por absorção.....	91
5.3.1 Gerador	92
5.3.2 Retificador	94
5.3.3 Condensador	97
5.3.4 Tubo ‘U’ e Tubo ‘H’	106

5.3.5 Evaporador	108
5.3.6 Absorvedor.....	114
5.3.7 Trocador de calor soluções	114
5.3.8 Tubo de direcionamento de solução fraca.....	116
5.4 Análise Paramétrica.....	116
6 RESULTADOS.....	117
6.1 Testes experimentais com corrente alternada	117
6.2 Testes experimentais com GLP.....	119
6.3 Testes experimentais com MCI.....	121
6.3.1 Testes experimentais com Diesel.....	121
6.3.1.1 Testes Diesel com carga variável e teste de 6 horas	126
6.3.2 Testes experimentais com Etanol.....	129
6.3.1.1 Testes Otto com carga variável decrescente	137
6.4 Comparações entre os testes.....	138
6.5 Resultados do Modelo Matemático	144
6.5.1 Validação.....	145
6.5.2 Gerador	146
6.5.3 Retificador	147
6.5.4 Condensador.....	148
6.5.5 Evaporador	148
6.5.6 Trocador de Calor de soluções.....	150
6.5.7 Tubo ‘U’, Tubo ‘H’, Absorvedor e Tubo de solução fraca	151
6.5.8 Análise Paramétrica.....	151
7 CONCLUSÕES	155
7.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	157
REFERÊNCIAS.....	158
Apêndice A – Propriedades da mistura água amônia	167
Apêndice B – Incertezas temperaturas.....	173
Apêndice C – Resultados MCI	174
Anexo A – Análise de incerteza das medições	177