PAULO SÉRGIO GERMANO CARVALHO

ESTUDO APLICADO DE ACV A SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO
E POR COMPRESSÃO DE VAPOR DE AMÔNIA

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2010

PAULO SÉRGIO GERMANO CARVALHO

ESTUDO APLICADO DE ACV A SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO
E POR COMPRESSÃO DE VAPOR DE AMÔNIA

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Doutor
Marcos de Mattos Pimenta

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de dezembro de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Carvalho, Paulo Sergio Germano

Estudo aplicado de ACV a ciclo de refrigeração por absorção: análise do ciclo de vida / P.S.G. Carvalho. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.

351 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Refrigeração 2. Máquinas frigoríficas 3. Ciclo de vida (Análise) 4. Absorção 5. Amônia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

A meus Pais, José Ávila e Maria da Glória,
que me ensinaram a remover montanhas
usando como ferramentas o trabalho e a força
de vontade.

À minha esposa, Maria Amélia, e as
minhas filhas Melyna Maryá e Layla
Louyse, que sempre entenderam que
mesmo estando ausente nos momentos de
lazer e confraternizações familiares,
estava presente a seus lados.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor orientador Dr. Marcos de Mattos Pimenta, EPUSP, por sua incansável disposição e notório saber.

Ao Professor Dr. Silvio de Oliveira, EPUSP, por ter me auxiliado principalmente no que se refere ao uso do software E.E.S.

Ao Professor Dr. Alberto Hernandez Neto, EPUSP, por sua grande contribuição na definição do presente tema.

Ao Professor MS Pedro Américo Frugolli, diretor Adjunto do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Paulista, por seu constante apoio e incentivo.

Ao Professor Dr. Biagio F. Gianetti, Unip, por ter plantado a semente que permitiu chegar a esta tese.

À Professora Dra. Cecília M.V.B.Almeida que em muito ajudou a clarear meu caminho.

Aos funcionários do C.P.D. da Universidade Paulista - UNIP, que sempre foram muito dedicados e gentis, auxiliando-me muito com a informática e seus mistérios, bem como sempre me disponibilizando computadores e impressoras.

Aos meus amigos Trovão e companhia Ltda., que nos nossos encontros aos sábados sempre me deram a força e determinação necessárias para a minha total dedicação a essa tese, neste meu momento de vida.

A todos os outros que contribuíram para ser possível realização desta tese.

RESUMO

A presente se tese desenvolve uma metodologia para comparar as substâncias emitidas na construção e operação de sistema frigorífico por absorção e por compressão de vapor de amônia usando a metodologia denominada Análise do Ciclo de Vida (ACV). Pesquisas bibliográficas feitas pelo autor desse trabalho permitem a conclusão de haver poucas informações que permitam a elaboração de um inventário de ciclo de vida para ciclo frigorífico por absorção e por compressão de vapor tendo como fluido de trabalho a amônia.

Realizado todo o dimensionamento termodinâmico e mecânico dos ciclos e aplicada a metodologia ACV, os resultados demonstram que a operação do ciclo frigorífico por compressão produz 626,91% mais de hidrocarbonetos quando comparada com a quantidade emitida devido a construção. Demonstram ainda que as substâncias emitidas são diferentes para o ciclo por absorção e para o por compressão de vapor de amônia.

Palavras – chave: sistemas frigoríficos; análise de ciclo de vida, amônia, ACV.

ABSTRACT

This thesis proposes to develop a way to compare the substances emitted in the construction and operation of a refrigeration cycle by absorption and compression of vapor ammonia using the methodology called Life Cycle Analysis (ACV). Bibliographic researches made by the author of this study suggest there is little information to allow the construction of an inventory of the life cycle to a refrigeration systems.

Carried out all the thermodynamic and mechanical design cycles and applied the ACV methodology, the results demonstrate that the operation of the compression cycle produce 626,91% more hydrocarbon in comparison with the construction. The results shows that the substances emitted by absorption or compression cycle are different.

.

Key words: refrigeration systems; Life Cycle Assessment; ammonia.

Índice

1.0.	Introdução.....	001
1.1.	Objetivos	004
2.0.	Revisão bibliográfica.....	006
2.1.	Sistema de refrigeração por absorção.....	009
2.2.	Princípio de funcionamento do sistema por absorção de vapor.....	012
2.3.	Funcionamento do sistema frigorífico por absorção de vapor	012
2.3.1.	Sistema frigorífico por absorção com funcionamento contínuo.....	016
2.4.	Sistemas de refrigeração por compressão de vapor.....	017
2.5.	Análise do ciclo de vida (ACV)	020
2.5.1.	Histórico e definição da ACV	020
3.0.	Análise do ciclo de vida (ACV)	024
3.1.	Difusão da metodologia ACV.....	024
3.2.	Metodologia da análise do ciclo de vida	030
3.2.1.	Definição dos objetivos e escopo	031
3.2.2.	Realização do inventário	032
3.2.3.	Relatório final	034
3.2.4.	Interpretação	035
4.0.	Definição do problema e considerações iniciais.....	037
5.0 .	Inventário do ciclo de vida de um sistema frigorífico com amônia	040
5.1.	Definições	040
5.1.1.	Objetivos	040
5.1.2.	Escopo	040
5.2.	Inventário do ciclo de vida	044
5.2.1.	Preparação para a coleta de dados.....	044
5.2.2.	Análise do ciclo de vida do aço.....	044
5.2.3.	Descrição dos insumos e emissões para os aços laminados utilizando o forno Linz – Donawitz	047
5.2.4.	Descrição dos insumos e emissões para os aços laminados utilizando o forno Siemens Martins - SM.....	049
5.2.5.	Descrição dos insumos e emissões para os aços laminados utilizando o forno elétrico	051
5.2.6.	Descrição dos insumos e emissões quando da produção de aços laminados utilizando o forno a coque.....	053
5.2.7.	Descrição dos insumos e emissões quando da produção de aços laminados utilizando alto forno a carvão vegetal	056
5.2.8.	Descrição dos insumos e emissões quando da produção de aços laminados utilizando a sinterização	058
5.2.9.	Descrição dos insumos e emissões quando da produção de aço laminado na coqueria	060
5.2.10.	Descrição dos insumos e emissões na obtenção do minério de ferro	061

5.2.11.	Descrição dos insumos e emissões na obtenção do carvão mineral	062
5.2.12.	Descrição dos insumos e emissões na obtenção do carvão vegetal .	063
5.2.13.	Descrição dos insumos e emissões na obtenção do oxigênio	066
5.2.14.	Descrição dos insumos e emissões na obtenção dos fundentes.....	067
5.2.15.	O uso das sucatas no processo de fabricação do aço	067
5.3.	Consolidação dos insumos e rejeitos na produção de aço laminado em condições brasileiras	069
6.0.	Processo de manufatura dos tubos utilizados na construção dos trocadores de calor	071
6.1.	Detalhamento do processo de dobragem das chapas para confecção dos tubos	076
7.0	Impacto Ambiental em usinas hidrelétricas	083
7.1.	Hidrelétricas e a matriz energética brasileira	084
7.2.	ACV e as usinas hidrelétricas no Brasil.....	086
7.3.	Desenvolvimento da ACV para a energia elétrica	087
7.4.	Premissas utilizadas no inventario do ciclo de vida (ICV) da usina hidrelétrica de Itaipu	089
8.0.	Impacto ambiental da amônia	093
8.1.	Fases na produção da amônia	093
9.	Gás natural.....	098
9.1.	ACV do gás natural – Cadeia produtiva.....	098
9.2.	Composição química dos efluentes	100
9.3.	Impactos sobre o Meio Aquático	100
9.3.1.	Água de produção	101
9.3.2.	Fluido de perfuração e cascalhos	102
9.3.3.	Substâncias químicas para o tratamento do poço	102
9.3.4	Água de drenagem, lavagem e processo	103
9.3.5	Esgotos	103
9.4.	Os Impactos Atmosféricos	104
9.5.	Sistema de produto para o gás natural e fronteiras	105
9.6.	Requisito da qualidade de dados e análise do inventário	106
9.7.	Inventário do gás natural	112
10.0.	Metodologia aplicada e resultados.....	121
10.1.	Dimensionamento do sistema frigorífico por absorção de amônia.....	122
10.1.1.	Dimensionamento da área de troca de calor e cálculo da massa de aço utilizada na construção do condensador.....	130
10.1.2.	Dimensionamento das áreas da troca de calor e cálculo da massa de aço utilizada na construção de trocadores de calor	134
10.2.	Determinação das emissões geradas pelo processo de produção do aço empregado na fabricação dos tubos, utilizados na interligação dos diversos equipamentos do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	140
10.3.	Determinação das emissões geradas pelo processo de fabricação dos tubos a partir das chapas de aço.....	145

10.4.	Dimensionamento da quantidade de aço utilizada na construção do gasoduto.....	147
10.5.	Dimensionamento da quantidade de amônia utilizada na construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	151
10.6.	Determinação do total das substâncias geradas pela construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	156
10.7.	Determinação do consumo de gás natural na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	160
10.7.1.	Determinação das emissões geradas pelo uso do gás natural na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	161
10.7.2.	Determinação das emissões geradas pelo processo de refino do gás natural utilizado na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	162
10.7.3.	Determinação das emissões geradas pela combustão do gás natural.....	163
10.7.4.	Determinação das emissões geradas pelo processamento e combustão do gás natural.....	164
10.8.	Determinação das emissões geradas pelo consumo de energia elétrica durante o funcionamento do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	165
10.9.	Comparação percentual em massa das substâncias impactantes geradas na construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	166
10.9.1.	Comparação percentual em massa das emissões atmosféricas originadas pela construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	166
10.9.2.	Comparação percentual em massa dos efluentes líquidos originados pela construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	167
10.9.3.	Comparação percentual em massa dos resíduos sólidos originados pela construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	170
10.9.4.	Comparação do percentual em massa de cada substância impactante utilizada na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	172
10.9.5.	Comparação percentual em massa de cada substância impactante utilizada na construção e operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	175
10.10.	Condições admitidas no sistema frigorífico por compressão de vapor.....	176
10.10.1.	Dimensionamento das áreas de troca de calor e cálculo da massa de aço utilizada na construção dos trocadores de calor.....	179

	Dimensionamento da área de troca de calor e cálculo da	
10.10.1.1.	massa de aço utilizada na construção do condensador do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	184
10.10.1.2.	Determinação das emissões geradas pelo processo de fabricação do aço utilizado nos tubos de interligação dos diversos equipamentos do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	187
10.10.1.3.	Determinação das emissões geradas pelo processo de fabricação dos tubos utilizados no sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia a partir das chapas de aço.....	190
10.11.	Dimensionamento da quantidade de amônia utilizada na construção do sistema frigorífico por compressão de vapor	191
10.12.	Determinação do total das emissões geradas pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	194
10.13.	Determinação das emissões geradas pelo uso da eletricidade no sistema frigorífico por compressão de vapor.....	197
10.14.	Comparação percentual em massa das substâncias impactantes utilizadas na construção do sistema frigorífico por compressão de vapor	198
10.14.1.	Comparação percentual em massa das emissões atmosféricas originadas pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor	198
10.14.2.	Comparação percentual em massa dos efluentes líquidos originados pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor	202
10.14.3.	Comparação percentual em massa dos efluentes líquidos originados pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor	203
10.14.4.	Comparação percentual em massa dos resíduos sólidos originados pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	205
10.14.5.	Comparação percentual em massa de cada substância impactante utilizada na operação do sistema frigorífico por compressão de vapor ..	207
10.14.6.	Comparação percentual em massa de cada substância impactante utilizadas na construção e operação do sistema frigorífico por compressão de vapor	209
10.14.7.	Comparação percentual em massa das substâncias impactantes geradas na construção e operação dos sistemas frigoríficos por compressão e por absorção de vapor	209
11.	Análise Crítica dos Resultados e Conclusões	212
11.1.	Considerações Gerais	212
11.2.	Análise dos Resultados	213
11.3.	Conclusões	222
11.4.	Recomendações e Sugestões	225
11.5.	Considerações finais.....	226
12.	Referências Bibliográficas.....	227

ANEXO A

	Equações e definições utilizadas no dimensionamento dos sistemas frigoríficos por absorção e por compressão de vapor de amônia	237
A.1.	Metodologia de cálculo do sistema frigorífico por absorção de amônia.....	239
A.1.1.	Hipóteses utilizadas nos balanços de massas e energias	241
A.1.2.	Absorvedor do sistema frigorífico por absorção de amônia	241
A.1.3.	Evaporador do sistema frigorífico por absorção de amônia	244
A.1.3.1.	Dimensionamento do evaporador do sistema frigorífico por absorção de amônia	247
A.1.4.	Condensador do sistema frigorífico por absorção	253
A.1.4.1.	Dimensionamento das aletas do condensador do sistema frigorífico por absorção de amônia	256
A.1.5.	Retificador do sistema frigorífico por absorção de amônia	261
A.1.6.	Desabsorvedor ou gerador de vapor	264
A.1.6.1.	Princípio construtivo do gerador de vapor do sistema frigorífico por absorção de amônia	265
A.1.7.	Válvulas de expansão do sistema frigorífico por absorção de amônia	268
A.1.7.1.	Tipos de válvula de expansão do sistema frigorífico por absorção de amônia.....	268
A.1.7.1.1.	Válvula de expansão manual aplicada ao sistema frigorífico por absorção de amônia	268
A.1.7.1.2.	Válvula de expansão automática com pressão constante aplicada ao sistema frigorífico por absorção.....	269
A.1.8.	Bomba do ciclo frigorífico por absorção de amônia	273
A.1.9.	Coefficiente de eficácia do sistema frigorífico por absorção	275
A.2.	Metodologia de cálculo para o sistema frigorífico por compressão de vapor	279
A.2.1.	Dimensionamento sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia	279
A.2.1.1.	Dimensionamento termodinâmico do evaporador do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	280
A.2.1.2.	Dimensionamento termodinâmico do compressor do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	281
A.2.1.3.	Dimensionamento termodinâmico do condensador do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia	282
A.2.1.4.	Considerações sobre a válvula de expansão no sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia	283
A.2.1.5.	Determinação do coeficiente de eficácia do sistema por compressão de vapor de amônia	284
A.3.	Dimensionamento da área de troca de calor do evaporador e do condensador no sistema frigorífico por compressão de amônia	284

A.3.1.	Dimensionamento da área de troca de calor do evaporador no sistema frigorífico por compressão de amônia	284
A.3.2.	Dimensionamento da área de troca de calor do condensador no sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia	291
A.3.2.1.	Dimensionamento das aletas do condensador	291

ANEXO B

	Dimensionamento do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	298
B.1.	Parâmetros iniciais.....	298
B.2.	Evaporador.....	298
B.3.	Condensador	298
B.4.	Trocador de calor.....	299
B.5.	Características do gasoduto.....	299
B.5.1.	Gasvol.....	299
B.5.2.	Gaspal.....	299
B.6.	Comprimento em m dos tubos que interligam os diversos equipamentos	300
B.7.	Manufatura dos tubos – dobra.....	300
B.8.	Solução do sistema frigorífico.....	300
B.9.	Dimensionamento da quantidade de aço utilizada na construção.....	304
B.9.1.	Condensador.....	304
B.9.2.	Aleta.....	305
B.9.3.	Evaporador.....	306
B.9.4.	Trocador de calor.....	308
B.10.	Quantidade de aço utilizada na construção dos tubos que interligam os diversos equipamentos	311
B.11.	Determinação da potência necessária a dobra dos tubos.....	311
B.12.	Dimensionamento da quantidade de aço utilizada na construção do gasoduto.....	312
B.13.	Determinação da massa de aço total utilizada no sistema frigorífico por absorção considerando também o gasoduto.....	312
B.14.	Determinação da quantidade em massa de amônia no sistema frigorífico	312
B.15.	Determinação da vazão de gás natural necessária ao funcionamento do gerador -desabsorvedor	313
B.16.	Energia consumida pela bomba.....	313

Anexo C

	Resultados do dimensionamento do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	314
--	---	-----

Anexo D

	Dimensionamento do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	317
D.1.	Parâmetros iniciais.....	317
D.2.	Evaporador.....	317
D.3.	Condensador	317
D.4.	Comprimento em m dos tubos que interligam os diversos equipamentos	318
D.5.	Solução	318
D.6.	Dimensionamento da quantidade de aço utilizada na construção do sistema frigorífico por compressão.....	320
D.6.1.	Condensador.....	320
D.6.2.	Evaporador.....	321
D.7.	Manufatura dos tubos de interligação.....	323
D.8.	Determinação da potência necessária a dobra dos tubos.....	323
D.9.	Determinação da quantidade em massa de amônia.....	323
D.10.	Energia consumida pelo compressor	324

Anexo E

	Resultados do dimensionamento do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	325
--	---	-----

Anexo F

	Considerações preliminares sobre a amônia.....	326
F.1.	A descoberta do processo de síntese da amônia.....	328

Anexo G

	Considerações preliminares sobre o gás natural.....	332
G.1.	O gás natural no Brasil.....	333
G.2.	Gasoduto - detalhes.....	336
G.3.	Estação de compressão.....	340
G.4.	Estações de redução de pressão e medição (ERPM – <i>city gate</i>).....	341
G.5.	Gás natural e suas principais características	342
G.6.	Composição química do gás natural brasileiro.....	344
G.7.	Exploração do gás natural	347
G.8.	Armazenamento.....	349

Anexo H

Tabela dimensional de tubos padrão Schedule com ou sem costura	351
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Foto externa do sistema frigorífico por absorção fabricado pela Robur	006
Figura 2.2.	Esquema de funcionamento do sistema de refrigeração por absorção	013
Figura 2.3.	Diagrama pressão entalpia de um sistema de refrigeração por compressão de vapor	018
Figura 2.4.	Esquema ilustrativo dos principais componentes de um sistema de refrigeração por compressão de vapor	019
Figura 3.1.	Ciclo do carbono	026
Figura 3.2.	Rótulo ambiental ABNT Brasil	030
Figura 3.3.	Fases de uma análise de ciclo de vida ACV	031
Figura 4.1.	Esquema de um sistema frigorífico por absorção	037
Figura 5.1.	Principais insumos e rejeitos na construção e operação de um sistema frigorífico por absorção	042
Figura 5.2.	Etapas do ciclo de vida do aço laminado	046
Figura 6.1.	Tubo antes de ser “ costurado”	071
Figura 6.2.	Bobina de aço utilizada na manufatura dos tubos	072
Figura 6.3.	Tubo sendo soldado (costurado) pelo processo TIG	074
Figura 6.4.	Teste hidrostático em tubos	075
Figura 6.5.	Equipamento utilizado para a fabricação de tubos com costura	076
Figura 6.6.	Fases do processo de dobragem das chapas	077
Figura 6.7.	Dimensões da peça antes e após ser dobrada	078
Figura 6.8.	Sucessivas deformações sofridas por uma tira de aço no processo de obtenção de tubos circulares.....	080
Figura 6.9.	Processo de união das bordas do tubo por caldeamento	081
Figura 6.10.	Tubo sendo costurado pelo sistema <i>E.W.R</i>	082
Figura 6.11.	Anglo de rotação	082
Figura 7.1.	Consumo energético brasileiro por fonte (B.E.N 2009).....	084
Figura 7.2.	Percentual de cada forma de energia consumida no setor industrial (B.E.N 2009)	085
Figura 7.3.	Insumos analisados na hidrelétrica de Itaipu (RIBEIRO, 2003).....	089
Figura 7.4.	Parâmetros e ciclos de vida analisados na hidrelétrica de Itaipu (RIBEIRO,2003)	091
Figura 8.1.	Processo que ocorre no reformador catalítico- estágio I	093
Figura 8.2.	Fase I do processo de síntese da amônia	094
Figura 8.3.	Fase II do processo de síntese da amônia	095
Figura 8.4.	Processo do reformador catalítico – fase III.....	095
Figura 8.5.	Processo do reformador catalítico- fase IV	096
Figura 9.1	Esquema da cadeia produtiva do gás natural. Fonte: Transpetro, 2008.....	098

Figura 9.2.	Robô ambiental projetado para a fase de exploração. Fonte: Transpetro, 2008	099
Figura 9.3	Etapas da cadeia produtiva do gás natural	105
Figura 9.4.	Esquema dos processos sofridos pelo gás natural no terminal de Cabiúnas.	107
Figura 9.5.	Processos que o gás natural sofre na Reduc	110
Figura 9.6.	Sistema de gasodutos sudeste. Fonte: Comgás.....	111
Figura 9.7.	Ilustração da malha dos gasodutos no estado de S.Paulo. Fonte: Comgás.....	112
Figura 10.1.	Esquema do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia exibindo os pontos utilizados na determinação das propriedades termodinâmicas	122
Figura 10.2.	Emissões atmosféricas, com percentual em massa superior a 1%, geradas pela construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	167
Figura 10.3.	Efluentes líquidos com percentuais acima de 9%.....	169
Figura 10.4.	Efluentes líquidos com percentuais entre 0,05% e 1%.....	169
Figura 10.5.	Efluentes líquidos com percentual em massa entre 0,0 e 0,0020%.....	170
Figura 10.6.	Resíduos sólidos com teores acima de 40%.....	171
Figura 10.7.	Resíduos sólidos com teores entre 0% e 0,35%.....	171
Figura 10.8.	Percentual em massa das emissões atmosféricas acima de 0,5% devido ao uso de eletricidade e gás natural (inclui processamento) na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	173
Figura 10.9.	Percentual em massa das emissões atmosféricas entre 0,0025% e 0,060%, devido ao uso de eletricidade e gás natural (inclui processamento), na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	173
Figura 10.10.	Percentual em massa das emissões atmosféricas entre 0,001% e 0,003%, devido ao uso de eletricidade e gás natural (inclui processamento) na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	174
Figura 10.11.	Percentual em massa das emissões atmosféricas entre 0,0% e 0,000020% devido ao uso de eletricidade e gás natural (inclui processamento) na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	175
Figura 10.12.	Emissões atmosféricas com percentual em massa acima de 6%, geradas pela construção do sistema frigorífico por compressão	200
Figura 10.13.	Emissões atmosféricas com percentual em massa entre 0,02% e 0,7% geradas pela construção do sistema frigorífico por compressão.....	200
Figura 10.14.	Emissões atmosféricas com percentual em massa entre 0,0% e 0,005% geradas devido à construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	201

Figura 10.15.	Efluentes líquidos que apresentam percentuais acima de 5%.....	203
Figura 10.16.	Efluentes líquidos com percentuais entre 0,02% e 0,80%.....	204
Figura 10.17.	Efluentes líquidos com percentuais entre 0,001% e 0,010%.....	204
Figura 10.18.	Efluentes líquidos com percentuais entre 0% e 0,00070%.....	205
Figura 10.19.	Resíduos sólidos com teores acima de 40%.....	206
Figura 10.20.	Resíduos sólidos com percentual em massa entre 0% e 0,35%.....	206
Figura 10.21.	Emissões atmosféricas com percentual em massa entre 9% e 90%.....	207
Figura 10.22.	Emissões atmosféricas com percentual em massa entre 0,02% e 0,10%.....	208
Figura 10.25.	Emissões atmosféricas com percentual em massa entre 0,02% e 0,10%.....	208

Anexo A

Figura A.1.	Evaporação de uma mistura bifásica - diagrama temperatura x fração máxima.....	238
Figura A.2.	Esquema da unidade refrigeração por absorção operando com água e amônia.....	239
Figura A.3.	Esquema do absorvedor	242
Figura A.4.	Diagrama temperatura x fração mássica ao ocorrer o processo de mistura no interior do absorvedor.....	243
Figura A.5.	Esquema do evaporador	245
Figura A.6.	Diagrama temperatura x fração mássica para o processo de evaporação a pressão constante	246
Figura A.7.	Esquema do condensador	254
Figura A.8.	Diagrama temperatura x fração mássica para o processo isobárico de condensação	255
Figura A.9.	Esquema do retificador acoplado ao gerador	262
Figura A.10.	Diagrama temperatura x fração mássica para o processo de retificação do vapor refrigerante a pressão constante	262
Figura A.11.	Esquema do gerador de vapor	265
Figura A.12.	Diagrama temperatura x fração mássica para o processo de geração de vapor refrigerante a pressão constante	266
Figura A.13.	Diagrama temperatura x fração mássica para as válvulas de expansão 1 e 2	273
Figura A.14.	Diagrama temperatura x fração mássica para o aumento de pressão realizado pela bomba	275
Figura A.15.	Esquema da unidade de refrigeração por compressão de vapor de amônia	279

Figura A.16.	Esquema do evaporador do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia	280
Figura A.17.	Esquema do condensador	283
Figura G.1.	Navio para transporte de gás natural na fase líquida.....	336
Figura G.2.	Escavação para enterrar tubo de gasoduto. Fonte Transpetro, 2008.	337
Figura G.3.	Ilustração de um gasoduto construído sobre o mar	338
Figura G.4.	Ilustração de um gasoduto a céu aberto. Fonte Transpetro, 2008.....	338
Figura G.5.	Ilustração da construção do gasoduto Brasil - Bolívia no ramal Campinas - Rio de Janeiro. Fonte Lucas Lacaz Ruiz.....	339
Figura G.6.	Evolução da pressão ao longo de um gasoduto com estação de compressão. Fonte CTPETRO, 2003.....	340
Figura G.7.	Aquecedor de estação de redução de pressão e medição (ERPM)	341
Figura G.8.	Ilustração de um <i>city gate</i> de uma ERPM. Fonte Transpetro, 2008..	342
Figura G.9.	Tanque de armazenamento de gás natural na fase líquida.....	350

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Consumo de energia x PIB brasileiro	002
Tabela 2.1	Resumo dos principais estudos desenvolvidos com o sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	011
Tabela 2.2	Pares utilizados em sistemas de Absorção	015
Tabela 3.1	Insumos e rejeitos no refino de 59,3kg de petróleo	028
Tabela 5.1	Valores consolidados para a produção de 1 tonelada de aço na forma de lingotes utilizando o forno Linz- Donawitz	047
Tabela 5.2	Valores consolidados para a produção de 1 tonelada de aço na forma de lingotes utilizando o forno Siemens-Martin	051
Tabela 5.3	Relação da composição dos contaminantes produzidos em uma aciaria elétrica	053
Tabela 5.4	Visão geral dos componentes de entrada e saída na produção do gusa .	056
Tabela 5.5	Visão geral dos componentes de entrada e saída na produção do gusa no alto forno a carvão vegetal	057
Tabela 5.6	Visão geral dos aspectos ambientais de entrada e de saída de sinter	059
Tabela 5.7	Insumos de entrada e saída da coqueificação	060
Tabela 5.8	Dados consolidados para obtenção de 1 tonelada de carvão vegetal	066
Tabela 5.9	Apresentação dos dados necessários para elaboração do inventário na produção do aço- emissões atmosféricas	069
Tabela 5.10	Apresentação dos dados necessários para elaboração do inventário na produção do aço- efluentes líquidos	070
Tabela 5.11	Apresentação dos dados necessários para elaboração do inventário na produção do aço- resíduos sólidos	070
Tabela 7.1	Resultados compilados da análise do ciclo de vida da hidrelétrica de Itaipu (RIBEIRO,2003).....	092
Tabela 8.1	Inventário da produção de 1,217 toneladas de amônia por reforma catalítica do gás natural (RIBEIRO,2009).....	097
Tabela 9.1.	Concentrações médias presentes na água de produção da Bacia de Campo	103
Tabela 9.2.	Composição do gás ao chegar á usina de processamento de Cabiúnas. Fonte: Petrobras	106
Tabela 9.3.	Ilustra a fração molar recuperada na UPGN pela absorção refrigerada Fonte: Maia, 2000	109
Tabela 9.4.	Ilustra a fração molar recuperada na URL pela absorção refrigerada Fonte: Maia, 2000	109
Tabela 9.5.	Fração molar recuperada na UPGN (3) - Turbo expansão Fonte: Maia, 2000	109
Tabela 9.6.	Processo de remoção e recuperação do enxofre.....	112
Tabela 9.7.	Composição química do gás natural ao entrar na REDUC. Fonte: Reduc Petrobras.....	113

Tabela 9.8	Relação dos gases emitidos na combustão do gás natural.....	114
Tabela 9.9	Inventário dos insumos da compressão do gás natural	114
Tabela 9.10	Consolidação do balanço de massa e energia na UPGN Absorção refrigerada.....	115
Tabela 9.11	Consolidação do balanço de massa e energia na UPGN Absorção Refrigerada	116
Tabela 9.12	Inventário da unidade de processamento de gás natural (UPGN) – processo de absorção refrigerada.....	117
Tabela 9.13	Inventário da unidade de remoção de líquidos (URL) processo de absorção refrigerada	118
Tabela 9.14	Balanço de massa e energia da unidade de processamento de gás (UPGN) - processo de turbo expansão.....	118
Tabela 9.15	Inventário da unidade de processamento de gás (UPGN) - processo de turbo expansão.....	119
Tabela 9.16	Balanço de massa na produção de gás natural em Cabiúnas – RJ	120
Tabela 9.17	Inventário para produção de gás natural na unidade de Cabiúnas	120
Tabela 10.1	Parâmetros admitidos no desenvolvimento da análise do ciclo de vida ao sistema por absorção de vapor de amônia	123
Tabela 10.2	Condições iniciais do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	123
Tabela 10.3	Valores das propriedades Termodinâmicas	124
Tabela 10.4	Valores das vazões em massa e energias fornecidas ou retiradas nos componentes calculados com as propriedades ilustradas na tabela 10.3.....	126
Tabela 10.5	Valores dos parâmetros admitidos para o dimensionamento do evaporador.....	127
Tabela 10.6	Emissões atmosféricas geradas durante a produção do aço utilizado na construção do evaporador da presente tese. Fonte: Autor.....	128
Tabela 10.7	Efluentes líquidos gerados devido à produção do aço utilizado na confecção do evaporador aletado da presente tese. Fonte: Autor	129
Tabela 10.8	Resíduos sólidos gerados durante a produção do aço utilizado na construção do evaporador aletado, da presente tese. Fonte: Autor.....	129
Tabela 10.9	Valores dos parâmetros admitidos para o dimensionamento do condensador.....	131
Tabela 10.10	Emissões atmosféricas geradas durante a produção do aço utilizado na construção do condensador aletado da presente tese.....	132
Tabela 10.11	Efluentes líquidos gerados devido à produção do aço, utilizado na confecção do condensador aletado da presente tese.....	133
Tabela 10.12	Resíduos sólidos gerados durante a produção do aço, utilizado na construção do condensador aletado da presente tese.....	133

Tabela 10.13	Massa das emissões atmosféricas geradas por unidade de energia utilizável no sistema frigorífico, devido ao aço empregado na construção do trocador de calor do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	138
Tabela 10.14	Massa dos efluentes líquidos gerados por unidade de energia utilizável no sistema frigorífico devido ao aço empregado na construção do trocador de calor do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	139
Tabela 10.15	Massa dos resíduos sólidos por unidade de energia utilizável no sistema frigorífico devido ao aço empregado na construção do trocador de calor do sistema frigorífico por absorção.....	139
Tabela 10.16	Comprimentos das tubulações do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	141
Tabela 10.17	Massa de aço utilizada na fabricação das tubulações do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	142
Tabela 10.18	Valores consolidados das emissões atmosféricas devido à produção do aço empregado na construção dos tubos, utilizados na interligação dos diversos componentes do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	143
Tabela 10.19	Valores consolidados dos efluentes líquidos devido à produção do aço empregado na construção dos tubos, utilizados na interligação dos diversos equipamentos do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	144
Tabela 10.20	Valores consolidados dos resíduos sólidos devido à produção do aço empregado na construção dos tubos, utilizados na interligação dos diversos equipamentos do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	144
Tabela 10.21	Valores considerados na solução da eq. (6.2) para determinação da energia necessária à conformação dos tubos utilizados no sistema frigorífico por absorção de vapor.....	145
Tabela 10.22	Energia necessária para dobrar as chapas e manufaturar os tubos.....	146
Tabela 10.23	Impactos ambientais devido ao uso de energia elétrica no processo de dobragem dos tubos.....	146
Tabela 10.24	Valores da massa de aço utilizada na construção dos gasodutos.....	147
Tabela 10.25	Fator de alocação do aço.....	148
Tabela 10.26	Valores consolidados das emissões atmosféricas oriundas da produção do aço utilizado na construção do gasoduto, que fornece gás natural ao sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	149
Tabela 10.27	Valores consolidado dos efluentes líquidos devido à produção do aço utilizado na construção do gasoduto que fornece gás natural ao sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	150
Tabela 10.28	Valores consolidados dos resíduos sólidos devido à produção do aço utilizado na construção do gasoduto que fornece gás natural ao sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	150

Tabela 10.29	Estimativa da massa de amônia contida no interior dos tubos que interligam os diversos equipamentos do sistema frigorífico por absorção.....	153
Tabela 10.30	Valor da massa de amônia nos equipamentos do sistema frigorífico por absorção	153
Tabela 10.31	Inventário da produção de 1kg de amônia por reforma catalítica do gás natural.....	154
Tabela 10.32	Substâncias emitidas devido à produção da amônia utilizada ao longo da vida útil do sistema frigorífico por absorção.....	155
Tabela 10.33	Emissões atmosféricas geradas devido à construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	158
Tabela 10.34	Efluentes líquidos gerados devido à construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	159
Tabela 10.35	Resíduos sólidos gerados devido à construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	160
Tabela 10.36	Valores das emissões geradas devido à produção de gás natural utilizado no funcionamento do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	163
Tabela 10.37	Valores das emissões devido à combustão do gás natural.....	163
Tabela 10.38	Valores totais emitidos devido ao processamento e combustão do gás natural.....	164
Tabela 10.39	Valores dos impactos gerados pelo consumo de energia elétrica pela bomba, no sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	165
Tabela 10.40	Classificação percentual em massa das emissões atmosféricas geradas na construção do sistema frigorífico por absorção.....	166
Tabela 10.41	Contribuição percentual em massa de cada efluente líquido gerado devido à construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	168
Tabela 10.42	Resíduos sólidos devido à construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	170
Tabela 10.43	Percentual em massa das emissões atmosféricas devido ao uso de eletricidade e gás natural (inclui processamento), na operação do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia.....	172
Tabela 10.44	Comparação percentual em massa das emissões atmosféricas oriundas da fase de construção com as oriundas da operação.....	175
Tabela 10.45	Características do ambiente e dados de entrada para a obtenção de resultados do sistema frigorífico por compressão.....	176
Tabela 10.46	Condições impostas ao sistema frigorífico por compressão de vapor.....	177
Tabela 10.47	Propriedades Termodinâmicas obtidas com o software <i>E.E.S.</i>	178
Tabela 10.48	Valores das vazões em massa e energias fornecidas ou retiradas pelo equipamento, calculadas com as propriedades ilustradas na tabela 10.43.....	179

Tabela 10.49	Valores dos parâmetros admitidos para o dimensionamento do evaporador do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	181
Tabela 10.50	Resultados consolidados para as emissões atmosféricas geradas durante a produção do aço utilizado na construção do evaporador aletado do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia Fonte: Autor.....	182
Tabela10.51	Consolida os resultados dos efluentes líquidos devido a produção do aço utilizado na confecção do evaporador aletado do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia para capacidade frigorífica de 1TR ou 3,5163kW. Fonte: Autor.....	183
Tabela 10.52	Resultados consolidados para os resíduos sólidos gerados durante a produção do aço, utilizado na construção do evaporador aletado do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia para capacidade frigorífica de 1TR ou 3,5163kW. Fonte Autor.....	183
Tabela 10.53	Valores dos parâmetros admitidos para o dimensionamento do condensador.....	185
Tabela 10.54	Resultados consolidados para as emissões atmosféricas geradas durante a produção do aço utilizado na construção do condensador aletado.....	186
Tabela 10.55	Efluentes líquidos devido a produção do aço utilizado no condensador.....	186
Tabela 10.56	Resultados consolidados para os resíduos sólidos gerados durante a produção do aço utilizado na construção do condensador aletado.....	187
Tabela 10.57	Comprimento das tubulações do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	188
Tabela 10.58	Consolida as emissões atmosféricas devido à produção do aço empregado na construção dos tubos de interligação dos equipamentos (sistema de compressão).....	188
Tabela 10.59	Evidencia os efluentes líquidos devido à produção do aço empregado na construção dos tubos de interligação dos equipamentos (sistema de compressão).....	189
Tabela 10.60	Valores dos resíduos sólidos devido à produção do aço empregado na construção dos tubos de interligação dos equipamentos (sistema de compressão).....	189
Tabela 10.61	Energia necessária para a dobragem das chapas e manufatura dos tubos.....	190
Tabela 10.62	Impactos ambientais da energia elétrica no processo de dobragem dos tubos utilizados no sistema frigorífico por compressão de vapor.....	191
Tabela 10.63	Massa de amônia contida no interior dos tubos que interligam os diversos equipamentos do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	192
Tabela 10.64	Valor estimativo da massa de amônia em cada equipamento utilizado na construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	193

Tabela 10.65	Valores das emissões atmosféricas devido à produção de amônia utilizada no sistema frigorífico por compressão de vapor.....	193
Tabela 10.66	Valores dos efluentes líquidos e resíduos sólidos devido à produção de amônia utilizada ao longo da vida útil do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	194
Tabela 10.67	Emissões atmosféricas geradas devido à construção do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	195
Tabela 10.68	Efluentes líquidos gerados devido à construção do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	196
Tabela 10.69	Valores dos resíduos sólidos gerados pela construção do sistema frigorífico por compressão de vapor de amônia.....	197
Tabela 10.70	Valores dos impactos gerados pelo consumo de energia elétrica no funcionamento do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	198
Tabela 10.71	Classificação percentual em massa das emissões atmosféricas geradas na construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	199
Tabela 10.72	Contribuição percentual em massa de efluentes líquidos gerados devido à construção do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	202
Tabela 10.73	Resíduos sólidos devido a construção do sistema frigorífico por compressão.....	205
Tabela 10.74	Percentual em massa das emissões atmosféricas devido à eletricidade na operação do sistema frigorífico por compressão de vapor.....	207
Tabela 10.75	Comparação percentual das emissões oriundas da fase de construção com as da operação.....	209
Tabela 10.76	Comparação percentual das substâncias emitidas na construção do sistema por absorção com o por compressão.....	210
Tabela 10.77	Comparação percentual das substâncias emitidas pelo funcionamento dos sistemas por absorção e por compressão de vapor de amônia.....	211
Tabela 11.1	Reprodução parcial da tabela 10.40.....	213
Tabela 11.2	Reprodução parcial da tabela 10.41.....	213
Tabela 11.3	Reprodução parcial da tabela 10.42.....	214
Tabela 11.4	Reprodução parcial da tabela 10.43.....	215
Tabela 11.5	Reprodução parcial da tabela 10.70.....	215
Tabela 11.6	Reprodução parcial da tabela 10.71.....	216
Tabela 11.7	Reprodução parcial da tabela 10.72.....	216
Tabela 11.8	Reprodução parcial da tabela 10.40 e tabela 10.70.....	217
Tabela 11.9	Reprodução parcial da tabela 10.41 e tabela 10.71.....	217
Tabela 11.10	Reprodução parcial da Tabela 10.42 e tabela 10.73.....	218
Tabela 11.11	Reprodução parcial da tabela 10.43 e tabela 10.73.....	218
Tabela 11.12	Reprodução parcial da tabela 10.74.....	219
Tabela 11.13	Reprodução parcial da tabela 10.75.....	220

Tabela 11.14	Reprodução parcial da tabela 10.76.....	221
Tabela G.1	Reservas provadas de gás no Brasil	334

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICV	Análise de impacto de ciclo de vida
AP	<i>Acidification potential</i> - Potencial de acidificação
CFC	Clorofluorocarboneto
DCO	Destrução da camada de ozônio
DTIE	<i>Division of Technology Industry and Environment</i> – Divisão Tecnológica da Indústria e Meio Ambiente
EE	Efeito Estufa
EP	<i>Eutrophication potential</i> – Potencial de eutroficação
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> – Agência de Proteção Ambiental
ETH	Instituto Suíço de Tecnologia e Meio Ambiente
ETP	<i>Eco toxicity potential</i> – Potencial de ecotoxicidade
FFO	Formação fotoquímica do Ozônio
GLP	Gás liquefeito do petróleo
GWP	<i>Global warming potential</i> – Potencial de efeito estufa
http	<i>Human toxicity potential</i> – Potencial humana de toxidade
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia
IFEU	Instituto de Pesquisa Sobre Energia e Meio Ambiente (Alemanha)
IBICT	Instituto Brasileiro de Informações em Ciência e Tecnologia
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Organização Internacional de Padronização
ITAL	Instituto Técnico de Alimentação
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> – Análise do Ciclo de Vida
MIT	<i>Institute Massachusetts</i> (EUA) – Instituto Massachussets
MRI	<i>Midwest Research Institute</i> - Instituto de Pesquisa Midwest
ODP	<i>Ozone depletion potential</i> – Destrução da camada de ozônio
ONS	Operador nacional de sistemas
PIB	Produto Interno Bruto
POCP	<i>Photochemical ozone creation potential</i> – Potencial fotoquímico de criação do ozônio
RMIT	Centro de projetos (Austrália)
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> – Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química
UNEP	<i>United Environment Program</i> – União dos Programas Ambientais
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i> - Conselho Mundial para o Desenvolvimento Sustentável
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> – Organização Meteorológica Mundial

LISTA DE VARIÁVEIS EMPREGADAS

Símbolo	Variável	Unidade
A	Área do trocador de calor no condensador ou no evaporador	m^2
A_{cd}	Área de troca de calor do condensador	m^2
A_{ev}	Área de troca de calor do evaporador	m^2
A_{fcd}	Área frontal do condensador	m^2
A_{fev}	Área frontal do evaporador	m^2
A_{1alev}	Área de troca de calor de uma única aleta do evaporador	m^2
A_{alcd}	Área de troca de calor do condensador com as aletas em uma única fila	m^2
b	Largura da tira	m
C	Quantidade de refrigerante	kg
$C.O.P$	Coeficiente de desempenho	Adimensional
CT	Carga térmica retirada no evaporador	kW
$c_{água}$	Calor específico da água	$\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$
Cp_{arcd}	Calor específico do fluido ar nas condições atmosféricas local	$\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$
Cp_{arev}	Calor específico do fluido ar nas condições do ambiente refrigerado	$\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$
C_{pmic}	Calor específico médio da mistura que escoar no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$
D_{casco}	Diâmetro do casco do trocador de calor	m
$D_{externo}$	Diâmetro externo do tubo	m
D_{eal}	Diâmetro externo da aleta transversal	m
D_{eev}	Diâmetro externo do tubo do evaporador.	m
D_{extaal}	Diâmetro externo da aleta transversal	m
D_{ecd}	Diâmetro externo do tubo do condensador	m

D_{eev}	Diâmetro externo do tubo do evaporador	m
D_{ealcd}	Diâmetro externo da aleta transversal ao tubo do condensador	m
$D_{int\,erno}$	Diâmetro interno do tubo	m
D_{icd}	Diâmetro interno do tubo do condensador	m
D_{iev}	Diâmetro interno do tubo usado na construção do evaporador	m
D_{itc}	Diâmetro interno do tubo do trocador de calor	m
D_{malcd}	Diâmetro médio logaritmo da aleta do condensador	m
D_{malev}	Diâmetro médio logaritmo da aleta do evaporador	m
e_{alcd}	Espessura da aleta do condensador	m
e_{alev}	Espessura da aleta do evaporador	m
e_{parede}	Espessura da parede do tubo.	m
e_{vcd}	Espaçamento entre as linhas de dentro dos tubos dispostos na horizontal	Adimensional
e_{vev}	Espaçamento entre os tubos dispostos na horizontal	m
e_{ttc}	Espessura da parede do tubo do trocador de calor	m
E	Módulo de elasticidade	MPa
ECO_2	Emissão de dióxido de carbono na geração de eletricidade	kg/kW
ED	Emissão direta equivalente de dióxido de carbono;	kg
EI	Emissão indireta equivalente de dióxido de carbono	kg
E_{bomba}	Energia consumida pela bomba ao longo da vida útil do sistema	J
E_{cp}	Energia consumida pelo compressor ao longo da vida útil do sistema;	J
En_{gaso}	Energia total que circula no gasoduto ao longo de toda a sua vida útil	J
FC =	Fator de carga ou de serviço	Adimensional
FC_{gaso}	Fator de carga do gasoduto	Adimensional
f_{alo}	Fator de alocação	Adimensional
g	Aceleração da gravidade	m/s ²

$G_{\max}$	Fluxo de massa por unidade de área	$\frac{kg}{sm^2}$
$\dot{G}_{icd}$	Fluxo em massa por unidade de área de escoamento.	$\frac{kg}{sm^2}$
$\dot{G}_{iev}$	Fluxo em massa por unidade de área de escoamento.	$\frac{kg}{sm^2}$
L	Percurso da deformação	mm
L_{cd}	Comprimento do condensador	m
L_{tcd}	Comprimento total do tubo usado para a construção do condensador	m
L_{tev}	Comprimento total tubo usado para a construção do evaporador	m
L_{tc}	Comprimento do trocador de calor	m
h_1	Entalpia específica da solução, forte em amônia na entrada da bomba	$\frac{kJ}{kg}$
h_2	Entalpia específica da solução forte em amônia na saída da bomba	$\frac{kJ}{kg}$
h_3	Entalpia específica da solução forte em amônia na entrada do gerador	$\frac{kJ}{kg}$
h_4	Entalpia específica da solução fraca em amônia na saída do gerador	$\frac{kJ}{kg}$
h_5	Entalpia específica da solução, fraca em amônia, na entrada do absorvedor oriunda do gerador	$\frac{kJ}{kg}$
h_6	Entalpia específica da amônia na saída do gerador-entrada do condensador	$\frac{kJ}{kg}$
h_7	Entalpia específica da amônia na saída do condensador	$\frac{kJ}{kg}$
h_8	Entalpia específica da amônia na entrada do evaporador	$\frac{kJ}{kg}$
h_9	Entalpia específica da amônia na saída do evaporador	$\frac{kJ}{kg}$

h_{10}	Entalpia específica na saída do condensador	$\frac{kJ}{kg}$
h_{11}	Entalpia específica na entrada do evaporador	$\frac{kJ}{kg}$
h_{12}	Entalpia específica na saída do evaporador	$\frac{kJ}{kg}$
$(h_3 - h_2)$	Diferença de entalpia específica entre a entrada e saída do compressor	$\frac{kJ}{kg}$
h_{alcd}	Altura da aleta do condensador	m
h_{alev}	Altura da aleta do evaporador	m
h_{arcd}	Coeficiente de película do ar externo ao condensador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
h_{arev}	Coeficiente de película do ar externo ao evaporador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
h_{cond}	Coeficiente de convecção devido à condensação	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
$h_{extcondensador}$	Coeficiente de filme da face interna do condensador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
$h_{extevaporador}$	Coeficiente de filme da face interna do evaporador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
h_{etc}	Coeficiente de película do fluido que escoar pelo lado externo do tubo do trocador de calor	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
h_{icd}	Coeficiente de película do fluido que escoar na parte interna dos tubos do condensador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
$h_{int\ condensador}$	Coeficiente de filme da face interna do condensador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
$h_{int\ evaporador}$	Coeficiente de filme da face interna do evaporador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
h_{iev}	Coeficiente de película do fluido que escoar na parte interna dos tubos do evaporador	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

h_{icd}	Coeficiente de convecção avaliado para o lado interno dos tubos do condensador	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
h_{ite}	Coeficiente de convecção no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
h_{lv}	Entalpia de vaporização avaliada à temperatura de condensação	$\frac{kJ}{kg}$
h_{lv}	Entalpia de vaporização	$\frac{kJ}{kg}$
H_{cd}	Altura do condensador	m
H_{cd}	Altura do condensador	m
H_{ev}	Altura do evaporador	m
K	Condutibilidade térmica do material da aleta	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
$k_{carcaça}$	Condutibilidade térmica da carcaça do gerador de vapor	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
k_f	Condutibilidade térmica do fluido que está condensando avaliada a temperatura de condensação	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
$K_{míte}$	Condutibilidade térmica média da mistura que escoar no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
$k_{liquido}$	Condutibilidade térmica na fase líquida	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
k_{tubo}	Condutibilidade térmica do material do tubo	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
K_{10}	Condutibilidade térmica da amônia na fase líquida	$\frac{W}{m^{\circ} C}$
m_A	Massa do componente A presente na mistura	kg
m_B	Massa do componente B presente na mistura	kg
$\dot{m}_{arcd}$	Vazão em massa de ar necessário para a operação do condensador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{arev}$	Vazão em massa do fluido ar externamente ao condensador	$\frac{kg}{s}$

$\dot{m}_{am} =$	Vazão em massa do refrigerante que circula no interior do tubo do condensador	$\frac{kg}{s}$
m_{cd}	Fator de forma da aleta do condensador	Adimensional
m_{ev}	Fator de forma da aleta no evaporador	Adimensional
$\dot{m}_{ger}$	Vazão em massa na entrada no gerador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{cd}$	Vazão em massa no condensador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_1$	Vazão em massa da solução forte em amônia na saída do absorvedor para a bomba.	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_3$	Vazão em massa da solução na fase líquida altamente concentrada já pré- aquecida pelo trocador de calor	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_4$	Vazão em massa da solução na fase líquida fracamente concentrada que deixa o gerador à alta temperatura	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_5$	Vazão em massa de solução fraca que retorna ao absorvedor	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_6$	Vazão em massa da solução fraca em amônia na entrada do absorvedor oriunda do gerador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_7$	Vazão em massa do vapor de amônia quase puro que deixa o gerador e dirige-se ao retificador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_8$	Vazão em massa da solução fraca em amônia que deixa o retificador e retorna ao gerador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_9$	Vazão em massa de amônia oriunda do evaporador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{10}$	Vazão em massa que deixa o condensador e dirige-se a válvula de expansão 1	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{11}$	Vazão em massa que deixa a válvula de expansão 1 e dirige-se ao evaporador	$\frac{kg}{s}$
$\dot{m}_{12}$	Vazão em massa de fluido refrigerante oriunda do evaporador	$\frac{kg}{s}$

$\dot{m}_{13}$	Vazão em massa da solução refrigerante que circula no evaporador	$\frac{kg}{s}$
M_{cd}	Total da massa de aço utilizada na construção do condensador do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	kg
M_{ev}	Total da massa de aço utilizada na construção do evaporador do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	kg
M_{gas}	Massa de gás em kg consumida pelo sistema frigorífico por absorção vapor de amônia ao longo de toda a sua vida útil	kg
M_{gaspal}	Total da massa de aço utilizada na construção do gasoduto que interliga a cidade de Volta Redonda à de São Paulo	kg
M_{gasvol}	Total da massa de aço utilizada na construção do gasoduto que interliga a refinaria de Cabiúnas à cidade de Volta Redonda, no estado do Rio de Janeiro	kg
M_{tc}	Total da massa de aço utilizada na construção do trocador de calor do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	kg
M_{ti}	Total da massa de aço utilizada na construção dos tubos de interligação dos equipamentos pertencentes ao sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	kg
$M_{totalecd}$	Massa total de aço empregada na construção do condensador	kg
$M_{totalev}$	Massa total de aço empregada na construção do evaporador	kg
$M_{totalic}$	Massa total de aço empregada na construção do trocador de calor	kg
$M_{açototal}$	Total da massa de aço utilizada na construção do sistema frigorífico por absorção de vapor de amônia	kg
N_{alev}	Número total de aletas utilizadas na construção do evaporador	Adimensional
N_{alcd}	Número total de aletas utilizadas na construção do condensador	Adimensional
N_{filcd}	Número de filas no condensador	Adimensional
N_{filev}	Número de filas no evaporador	Adimensional
N_p	Número de aletas por unidade de comprimento do tubo	Adimensional
N_{vcd}	Número de tubos dispostos na horizontal ao longo da altura do condensador	Adimensional
N_{vev}	Número de tubos dispostos na horizontal ao longo da altura do evaporador	Adimensional
$\dot{N}_{cp}$	Potência de acionamento do compressor	kW
$N_{anogaso}$	Vida útil do gasoduto	anos

O	Número de horas por ano do equipamento operando a plena carga	h/ano
P	Pressão de trabalho	Pa
P_{ot}	Potência do equipamento;	kW
PCI	Poder calorífico inferior	kJ/kg
$(P_2 - P_1)$	Diferença de pressão entre a entrada e saída da bomba	kPa
P_r	Número de Prandtl	Adimensional
P_1	Pressão na entrada da bomba	Pa
P_2	Pressão na saída da bomba	Pa
r	Raio de curvatura	mm
R	Porcentagem anual de refrigerante liberada na atmosfera devido a reposições e ou vazamentos	Adimensional
Re_{icd}	Número de Reynolds do escoamento interno aos tubos do condensador	Adimensional
Re_{iev}	Número de Reynolds do escoamento interno aos tubos do evaporador	Adimensional
R_{eitc}	Número de Reynolds do escoamento no interior do tubo do trocador de calor	Adimensional
$\dot{Q}_1$	Fluxo de calor fornecido à solução na passagem pelo préaquecedor	W
$\dot{Q}_{abs}$	Fluxo de calor rejeitado pelo absorvedor	W
$\dot{Q}_{cd}$	Fluxo de calor rejeitado pelo condensador	W
$\dot{Q}_{des}$	Fluxo de calor fornecido ao desabsorvedor	W
$\dot{Q}_{ev}$	Fluxo de calor recebido pelo evaporador	W
$\dot{Q}_{ger}$	Fluxo de calor fornecido ao absorvedor	W
$\dot{Q}_{tc}$	Fluxo de calor trocado no trocador de calor	W
$\dot{Q}_{ret}$	Fluxo de calor fornecido ao retificador	W
R	Raio da tubulação	m
S_{cd}	Área média da aleta do condensador onde ocorre troca de calor pelo mecanismo da condução	m ²
S_{ev}	Área média da aleta do evaporador onde ocorre troca de calor pelo mecanismo da condução	m ²

t	Espessura do material	m
T_{cam}	Temperatura média do ambiente frigorificado	°C
T_{amb}	Temperatura média do meio ambiente	°C
T_{cond}	Temperatura de condensação do fluido refrigerante	°C
T_{ev}	Temperatura de evaporação do fluido refrigerante	°C
T_2	Temperatura do fluído frio (se aquece ao longo do trocador) na entrada do trocador de calor	°C
T_3	Temperatura do fluído frio (se aquece ao longo do trocador) na saída do trocador de calor	°C
T_4	Temperatura do fluído quente (se resfria ao longo do trocador) na entrada do trocador de calor	°C
T_5	Temperatura do fluído quente (se resfria ao longo do trocador) na saída do trocador de calor	°C
t_9	Temperatura de condensação	°C
t_{amb}	Temperatura ambiente	°C
U	Coefficiente global de transferência de calor	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
U_{cd}	Coefficiente global de transferência de calor para o condensador	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
U_{ev}	Coefficiente global de transferência de calor para o evaporador	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
U_{tc}	Coefficiente global da troca de calor do trocador de calor	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$
V	Velocidade de corte	$\frac{m}{s}$
V_{arcd}	Velocidade do ar na aproximação do condensador	$\frac{m}{s}$
V_{arev}	Velocidade do ar ao se aproximar do evaporador	$\frac{m}{s}$

Vel_{iev}	Velocidade média do escoamento no interior dos tubos do evaporador	$\frac{m}{s}$
Vel_{icd}	Velocidade média do escoamento no interior dos tubos do condensador	$\frac{m}{s}$
V_{eluc}	Velocidade média do escoamento no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{m}{s}$
Vu	Vida útil do equipamento	anos
∇_{ev}	Volume de amônia no evaporador	m ³
∇_{abs}	Volume de amônia no absorvedor	m ³
$\dot{V}_{gas}$	Vazão volumétrica queimada de gás natural	Nm ³ /s
$\dot{V}_{gaso}$	Vazão em volume que circula no gasoduto	Nm ³ /s
X_{fr}	Concentração de amônia na solução rica	%
X_{fc}	Concentração de amônia na solução pobre	%
ΔT	Diferença de temperatura	°C
ΔT_{ev}	Diferença de temperatura no evaporador	°C
Δt_A	Maior diferença de temperatura medida entre os dois fluidos	°C
Δt_B	Menor diferença de temperatura medida entre os dois fluidos	°C
ΔT_{arcd}	Diferença de temperatura sofrida pelo fluido ar ao retirar o calor do condensador.	°C
ΔT_{aevr}	Diferença de temperatura sofrida pelo fluido ar ao passar pelo evaporador	°C
ΔTa_{vcd}	Diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura média da água de resfriamento em °C	°C
$\Delta t_{m \ln}$	Diferença de temperatura média logarítmica	°C
$\Delta T_{m \ln tc}$	Diferença de temperatura média logarítmica no trocador de calor	°C
$\dot{W}_b$	Potência da bomba	W
η_b	Rendimento da bomba	Adimensional
η_{alcd}	Eficiência térmica da aleta do condensador	Adimensional

η_{alev}	Eficiência térmica da aleta do evaporador	Adimensional
η_{bomba}	Rendimento global do processo de bombeamento	Adimensional
η_{cp}	Rendimento adiabático da compressão.	Adimensional
η_{comb}	Rendimento térmico da combustão	Adimensional
θ	Ângulo de curvatura	Adimensional
λ	Entalpia específica de vaporização	J/kg
μ	Viscosidade absoluta	$\frac{Ns}{m^2}$
μ_{meditc}	Viscosidade absoluta média do fluído que escoar no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{Ns}{m^2}$
μ_{iev}	Viscosidade absoluta do fluido que escoar no interior dos tubos do evaporador avaliado com as condições de pressão e temperatura da entrada do evaporador	$\frac{Ns}{m^2}$
μ_{mist}	Viscosidade absoluta média da mistura que escoar no interior do tubo do trocador de calor	$\frac{Ns}{m^2}$
μ_3	Viscosidade absoluta da amônia na saída do condensador;	$\frac{Ns}{m^2}$
μ_{10}	Viscosidade absoluta da amônia fase líquida	$\frac{Ns}{m^2}$
ρ	Massa específica do fluido que está condensando	$\frac{kg}{m^3}$
$\rho_{aço}$	Massa específica do aço	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{gas}	Massa específica do gás natural a CNT	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_l	Massa específica do líquido	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{arcl}	Massa específica do ar nas condições atmosférica local	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_v	Massa específica do vapor	$\frac{kg}{m^3}$

ρ_{arev}	Massa específica do ar nas condições atmosférica local	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_3	Massa específica da amônia na saída do condensador	$\frac{kg}{m^3}$
τ	Tensão de ruptura do material	Pa
v	Volume específico da mistura resultante do líquido A com B	$\frac{m^3}{kg}$
v_A	Volume específico do líquido A presente na mistura com B	$\frac{m^3}{kg}$
v_B	Volume específico do líquido B presente na mistura com A	$\frac{m^3}{kg}$
v_1	Volume específico da mistura água - amônia ao passar pela bomba	$\frac{m^3}{kg}$
v_2	Volume específico da solução avaliada na saída da bomba	$\frac{m^3}{kg}$
v_9	Volume específico avaliado na entrada do condensador	$\frac{m^3}{kg}$
v_{13}	Volume específico avaliado na saída do evaporador	$\frac{m^3}{kg}$
$v_{med\ itc}$	Volume específico médio do fluido que escoar no interior do tubo do trocador de calor	m ³ /s
v_{icd}	Viscosidade cinemática do fluido que escoar no interior de tubos do condensador avaliado com as condições de pressão e temperatura de entrada no mesmo.	$\frac{Ns}{m^2}$
v_{mist}	Viscosidade cinemática da mistura	m ² /s
v_{am}	Viscosidade cinemática da amônia avaliada à temperatura média	m ² /s
v_{agua}	Viscosidade cinemática da água avaliada à temperatura média	m ² /s
x_A	Fração mássica do componente A	Adimensional
x_1	Fração mássica da solução forte em amônia na saída do absorvedor para a bomba	Adimensional

x_3	Fração mássica da solução na fase líquida altamente concentrada, já préaquecida pelo trocador de calor	Adimensional
x_4	Fração mássica do líquido fracamente concentrado que deixa o gerador	Adimensional
x_5	Fração mássica da solução que deixa o trocador de calor e dirige-se a válvula de expansão 2.	Adimensional
x_6	Fração mássica da solução fraca em amônia na entrada do absorvedor oriunda do gerador	Adimensional
x_7	Fração mássica do vapor refrigerante que deixa o gerador	Adimensional
x_8	Fração mássica do vapor oriundo do retificador	Adimensional
x_9	Fração mássica na entrada do condensador	Adimensional
x_{10}	Fração mássica na saída do condensador	Adimensional
x_{11}	Fração mássica na entrada do evaporador	Adimensional
x_{12}	Fração mássica na entrada do evaporador	Adimensional
x_{13}	Fração mássica na saída do evaporador	Adimensional
X	Fração mássica	Adimensional