



Yipsy Roque Benito

**Modelagem da produção simultânea de frio,
calor e energia elétrica**

Dissertação de Mestrado

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

ncia térmica vs carga para um grupo gerador/turbina a gás operando com
Orientadores: José Alberto dos Reis Parise
José Viriato Coelho Vargas

Rio de Janeiro,

Abril de 2007

Yipsy Roque Benito

**Modelagem da produção simultânea de frio,
calor e energia elétrica**

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

José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

José Viriato Coelho Vargas

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPR

Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Nisio de Carvalho Lobo Brum

Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ

José Eugenio Leal

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

Rio de Janeiro, 27 de abril de 2007

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

Yipsy Roque Benito

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, em 1998. Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Refrigeração e Aproveitamento da Energia. Tem trabalhado em análises de sistemas energéticos.

Ficha Catalográfica

Benito, Yipsy Roque

Modelagem da produção simultânea de frio, calor e energia elétrica / Yipsy Roque Benito ; orientadores: José Alberto dos Reis Parise, José Viriato Coelho Vargas. – 2007.

126 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Cogeração. 3. Refrigeração por absorção. 4. Modelagem. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD:621

Para meus pais, Margot e Pablo

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. José Alberto dos Reis Parise, pela dedicação, pela força e por ter confiado na minha capacidade.

Ao meu co-orientador, Prof. José Viriato Coelho Vargas, pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Sandro Bastos Ferreira, pelas oportunas observações.

Ao Ricardo Hernandez Pereira e Marcus Pereira, pela disponibilização dos dados experimentais.

À Agência Nacional de Petróleo (ANP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Sector Petróleo e Gás (PRH-ANP/MCT).

Às agencias CNPq e FAPERJ, pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao grupo NILKO, pelo apoio financeiro.

Aos colegas e amigos da Pós-graduação, Frank, Ysrael, Juliana, Mayra, Ana Luíza, Germaín, Minchola, Epifânio, e Diogo, pela presença nos grandes e pequenos momentos.

À Rosely, Grace e Carolina, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela ajuda inestimável.

Ao Freddy, Alejandro e Lisbet, que seguem aqui, apesar da distância.

À minha irmã, Xenia.

E ao Pedro Rocha de Oliveira, por muitas coisas.

Resumo

Benito, Yipsy Roque; Parise, José Alberto dos Reis. **Modelagem da produção simultânea de frio, calor e energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2007. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho divide-se em dois estudos: uma análise global de sistemas de cogeração e uma modelagem de um ciclo de refrigeração por absorção. O primeiro estudo apresenta as equações dos balanços energéticos de um sistema de cogeração operando com dois motores térmicos distintos (turbina a gás e motor de combustão interna, ambos utilizando diesel como combustível). Para a produção de frio emprega-se um “chiller” de absorção, acionado a partir de calor de rejeito dos motores, e outro de compressão de vapor auxiliar. As equações de balanço de energia e de exergia, aplicadas a cada componente, formam um sistema não linear de equações que, resolvido, fornece o desempenho do sistema para diferentes condições de operação. O segundo estudo é parte de um projeto mais abrangente, destinado a desenvolver a tecnologia de um sistema de refrigeração por absorção. É apresentado o modelo matemático que caracteriza uma instalação de pequeno porte operando com uma mistura água-amônia. Foram aplicadas as equações de conservação de massa e energia para cada componente do ciclo, determinadas as propriedades termodinâmicas em cada ponto do ciclo e aplicadas hipóteses simplificadoras de modo a descrever matematicamente os processos físicos envolvidos. O modelo resultante foi aplicado a um sistema existente. A comparação entre os resultados previstos pelo modelo e os obtidos experimentalmente foi satisfatória. Uma vez implementados os modelos de ambos os estudos, realizaram-se simulações para casos particulares de operação, possibilitando a verificação da influência das principais variáveis sobre o desempenho dos sistemas analisados. Na solução dos modelos matemáticos foi utilizado o software EES ®.

Palavras-chave

Cogeração, refrigeração por absorção, modelagem

Abstract

Benito, Yipsy Roque; Parise, José Alberto dos Reis. **Modeling of offshore production of cold, heat and electrical power**. Rio de Janeiro, 2007. 126p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work embodies two studies: a global analysis of cogeneration systems and an absorption refrigeration cycle model. The first study presents the main equations for energy and exergy balances of a cogeneration system operating with two distinct prime movers (a gas turbine and an internal combustion engine, both powered by diesel oil). For cooling production, an absorption chiller, driven by the prime movers' waste heat, and an auxiliary vapor compression chiller are employed. The energy and exergy balance equations were applied to each component of the system, composing a non-linear system of algebraic equations whose solution provides the performance of the system under different operating conditions. The second study is part of a broader project aiming at the development of an absorption refrigeration system. A mathematical model is presented, describing a small-size absorption refrigeration installation employing a water-ammonia mixture as working fluid. Mass and energy conservation equations were applied to each component of the cycle. Thermodynamic properties of the working fluids were calculated at each point of the cycle. Also, simplifying assumptions were applied. The resulting model was applied to simulate the behavior of an existing system. Comparison of predicted results with experimental data was satisfactory. A parametric analysis was also carried out with the simulation model. The models of both studies were implemented in ESS® software. Simulations were carried out so as to analyze the systems under particular operational conditions and to assess the influence of the main variables on system performance.

Keywords

Cogeneration, absorption refrigeration, modeling.

Sumário

1 Introdução	19
1.1 Contexto geral	19
1.2 Preâmbulo	20
1.2.1 Demandas simultâneas de refrigeração e climatização, energia elétrica e aquecimento	20
1.2.2 Projeto DORAGEX	21
1.3 Objetivos	22
1.4 Organização do trabalho	23
2 Estudo termodinâmico de um sistema de cogeração operando com dois motores térmicos distintos.	24
2.1 Introdução	24
2.1.1 Objetivos do capítulo	27
2.2 Descrição do sistema	27
2.3 Modelo Termodinâmico	30
2.3.1 Hipóteses simplificadoras	30
2.3.2 Definições	31
2.3.3 Determinações da exergia	32
2.3.4 Balanço de energia nos motores térmicos	34
2.3.5 Contabilidade de exergia	34
2.3.5.1 Turbina a gás	35
2.3.5.2 Motor de combustão interna	35
2.3.5.3 <i>Chiller</i> de absorção	36
2.3.5.4 <i>Chiller</i> de compressão de vapor	36
2.3.5.5 Balanço global da exergia da planta	37
2.3.6 Solução	37
2.4 Análise paramétrica	38
2.4.1 Condições de operação	38
2.4.2 Valores numéricos adotados	39
2.4.3 Caso #1: Demanda de frio igual a produção do <i>chiller</i> de absorção, $\dot{Q}_{C,AC} = \dot{Q}_{C,DE}$	43
2.4.4 Caso #2: Produção de frio excede a demanda, $\dot{Q}_{C,AC} > \dot{Q}_{C,DE}$	48
2.4.5 Caso #3: Demanda de frio excede a produção frigorífica do <i>chiller</i> de absorção, $\dot{Q}_{C,AC} < \dot{Q}_{C,DE}$	55
3 Modelagem da refrigeração por absorção	62

3.1 Introdução	62
3.1.1 Justificativa	63
3.1.2 Objetivos	64
3.2 Revisão Bibliográfica	65
3.3 Descrição do sistema de refrigeração por absorção	68
3.3.1 Ciclo termodinâmico.	69
3.4 Modelo matemático	74
3.4.1 Hipóteses simplificadoras	75
3.4.2 Determinações das pressões	76
3.4.2.1 Pressão de condensação	76
3.4.2.2 Pressão de evaporação	77
3.4.2.3 Pressão intermediária	77
3.4.3 Balanços de energia, massa e espécies dos volumes de controle	79
3.4.3.1 Ciclo de amônia	79
3.4.3.1.1 Condensador	80
3.4.3.1.2 Evaporador	81
3.4.3.1.3 Regenerador interno	83
3.4.3.1.4 Dispositivos de expansão	85
3.4.3.2 Compressor térmico	87
3.4.3.2.1 Processo de absorção	87
3.4.3.2.1.1 Absorvedor-regenerador ou pré-absorvedor	88
3.4.3.2.1.2 Absorvedor resfriado por água	91
3.4.3.2.2 A bomba da solução	92
3.4.3.2.3 Retificador	93
3.4.3.2.4 Gerador	96
3.4.3.2.5 Dispositivo de expansão do compressor térmico	100
3.5 Solução	101
3.6 Simulação	101
3.6.1 Principais aproximações e constantes da simulação	103
3.6.2 Comparação com dados experimentais	104
3.7 Análise exergética	108
3.7.1 Determinação da exergia	108
3.7.2 Contabilidade de exergia	110
3.8 Análise de indicadores do desempenho do sistema	110
3.9 Análise paramétrica	111
4 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	117
4.1 Conclusões	117
4.2 Recomendações para trabalhos futuros	119
5 Referências Bibliográficas	121

Lista de figuras

Figura 1. Esquema geral da planta para geração de potencia elétrica e produção de frio	28
Figura 2. Eficiência térmica vs carga para um grupo gerador/turbina a gás operando com gás natural e com controle da carga parcial através da regulação da temperatura de entrada à turbina (Ferreira, 2002)	40
Figura 3. Eficiência térmica vs carga para um grupo gerador/motor de combustão interna operando com óleo Diesel. Pontos experimentais de Pereira (2006a)	40
Figura 4. Efeito da temperatura no COP do <i>chiller</i> de absorção (Colonna e Gabrielli, 2006)	42
Figura 5. Esquema da instalação para o caso #1. $\dot{Q}_{c,AC} = \dot{Q}_{c,DE}$	43
Figura 6. Razão de carga da turbina, C_{GT} em função da razão de demanda elétrica, g_w	44
Figura 7. Caso #1. Variação da produção de frio em função de λ para diferentes valores de demanda elétrica	45
Figura 8. Caso #1. Desempenhos globais e dos motores térmicos com a variação de λ , para $g_w = 1,0$	445
Figura 9. Caso #1. Comportamento de ECR e y_{GB} para $g_w = 1,0$	46
Figura 10. Caso #1. Variação da razão de conversão de energia com λ	47
Figura 11. Caso #1. Variação da eficiência racional da planta com λ	47
Figura 12. Esquema da instalação para o caso #2	48
Figura 13. Comparação da razão de conversão de energia do caso # 2 com a do caso # 1 para $g_w = 1,0$.	49
Figura 14. Comparação da eficiência racional do caso # 2 com a do caso # 1 para $g_w = 1,0$	50

Figura 15a. Caso # 2. Variação de ECR , y_{GB} e h com λ , para $R = 2$ e $g_w = 1,0$	50
Figura 15b. Caso #2. Comportamento de ECR , y_{GB} e h com λ , para $R = 2$ e $g_w = 0,5$	51
Figura 16a. Caso #2. Comportamento de ECR com R para $g_w = 1,0$	51
Figura 16b. Caso #2. Comportamento de ECR com R para $g_w = 0,5$	52
Figura 17a. Caso #2. Comportamento de y_{GB} com R , para $g_w = 1,0$	52
Figura 17b. Caso #2. Comportamento de y_{GB} com R , para $g_w = 0,5$	53
Figura 18a. Caso #2. Comportamento das eficiências racionais nos diferentes subsistemas da planta, para $g_w = 1,0$ e $R = 2$	53
Figura 18b. Caso #2. Comportamento das eficiências racionais nos diferentes subsistemas da planta, para $g_w = 0,5$ e $R = 2$	54
Figura 19a. Caso #2. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($g_w = 1,0$ e $R = 2$)	54
Figura 19b. Caso #2. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($g_w = 0,5$ e $R = 2$)	55
Figura 20. Esquema da instalação para o caso # 3	56
Figura 21. Comparação da razão de conversão de energia do Caso # 3 com a do Caso#1 para $g_w = 1,0$	57
Figura 22. Comparação da eficiência racional do caso # 3 com a do caso # 1 para $g_w = 1,0$	57
Figura 23a. Caso #3. Comportamento de ECR , y_{GB} e h com λ , para $g_w = 1,0$ e $R = 0,5$	58
Figura 23b. Caso #3. Comportamento de ECR , y_{GB} e h com λ , para $g_w = 0,5$ e	

$R = 0,5$	58
Figura 24a. Caso # 3. Desempenho global para $I = 0,6$ e $g_w = 1,0$	59
Figura 24b. Caso # 3. Desempenho global para $I = 0,6$ e $g_w = 0,5$	59
Figura 25a. Caso # 3. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($R = 0,5$ e $g_w = 1,0$)	60
Figura 25b. Caso # 3. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($R = 0,5$ e $g_w = 0,5$)	60
Figura 26a. Caso #3. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($I = 0,6$ e $g_w = 1,0$)	61
Figura 26b. Caso#3. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($I = 0,6$ e $g_w = 0,5$)	61
Figura 26c. Caso#3. Distribuição da exergia do combustível de entrada à planta em produtos, perdas e destruição ($I = 0,6$ e $g_w = 0,4$)	61
Figura 27. Ciclo básico de absorção	63
Figura 28. Instalação do refrigerador por absorção na UFPR	64
Figura 29. ROBUR. Esquema do modelo Robur GAHP-W operando de acordo com o ciclo de absorção de vapor. Fonte Robur, (2005)	71
Figura 30. Esquema P - T do ciclo de absorção de vapor com pré-aquecimento da solução forte no retificador e recirculação no pré-absorvedor	72
Figura 31. Plano h-x para a mistura amônia-água	75
Figura 32. Volume de controle do Condensador	80
Figura 33. Volume de controle do Evaporador	82
Figura 34. Regenerador interno	84
Figura 35. Dispositivos de expansão I e II	86
Figura 36. Absorvedor regenerativo	88
Figura 37. Mistura adiabática pelo lado da carcaça	89
Figura 38. Representação esquemática dos processos de absorção no diagrama h-x	90

Figura 39. Absorvedor resfriado por água	91
Figura 40. Bomba da solução	93
Figura 41. Resfriador de refluxo	94
Figura 42. Processo de troca de calor prévio à troca de massa	94
Figura 43. Representação esquemática do processo de retificação no diagrama h-x	95
Figura 44 Volume de controle do gerador	96
Figura 45 Gerador. Volumes de controle internos	97
Figura 46. Representação esquemática do processo de geração no diagrama h-x	99
Figura 47. Detalhe do diagrama h-x para a mistura água-amônia na região de altas pressões para concentrações próximas a 1	102
Figura 48. Comparação das temperaturas de saída da solução gelada de água-etilenoglicol com dados experimentais	105
Figura 49. Comparação das temperaturas de saída da água quente com dados experimentais	105
Figura 50. Comparação entre as taxas de refrigeração e de rejeito previstas e experimentais	106
Figura 51. Potência frigorífica em função da vazão de solução gelada para diferentes vazões de água quente	106
Figura 52. Potência térmica de rejeito em função da vazão de água quente para diferentes vazões de solução gelada	107
Figura 53. Pressão de condensação em função da vazão de água quente. $T_{hw;in} = 295 K ; T_{cw;in} = 288 K , \dot{m}_{cw} = 0,37 kg / s$	112
Figura 54. Pressão de evaporação em função da vazão de solução fria. $T_{hw;in} = 295 K ; T_{cw;in} = 288 K \dot{m}_{hw} = 0,40 kg / s$	112
Figura 55. Potência frigorífica versus vazão de solução fria para $T_{hw;in} = 295 K ; T_{cw;in} = 288 K$	113
Figura 56. Temperatura de saída da água quente versus vazão de água quente para $T_{hw;in} = 295 K ; T_{cw;in} = 288 K$ e para diferentes vazões de solução gelada	113
Figura 57. Taxa de fornecimento de calor no gerador em função da vazão de solução gelada para vários valores da vazão de água quente para $T_{hw;in} = 295 K ; T_{cw;in} = 288 K$	114
Figura 58. Desempenho do sistema para $\dot{m}_{hw} = 0,5 kg/s ; T_{hw;in} = 295 K ;$ $T_{cw;in} = 288 K$	114

Figura 59. Temperaturas de saída da água quente e da solução fria em função da vazão da solução fria para $\dot{m}_{hw} = 0,5 \text{ kg/s}$,
 $T_{hw;in} = 295 K$; $T_{cw;in} = 288 K$ 115

Figura 60. Vazão de refrigerante em função da vazão de água quente.
 $T_{hw;in} = 295 K$; $T_{cw;in} = 288 K$ e $\dot{m}_{cw} = 0,37 \text{ kg / s}$ 115

Figura 61. Efetividade do absorvedor esfriado por água em função da vazão de água quente, para diferentes vazões de solução fria.
 $T_{hw;in} = 295 K$; $T_{cw;in} = 288 K$ 116

Lista de tabelas

Tabela 1. Dados obtidos a partir dos casos analisados por Colonna e Gabrielli (2006)	41
Tabela 2. Dados nominais do Robur, modelo GAHP-W (Robur, 2005).	69
Tabela 3. Estados termodinâmicos do sistema.	73

Simbologia

a	Coeficiente dependente do grau de sub-resfriamento, – equação (3.9)	–
a_i	Coeficientes da função, equação (12)	–
b_i	Coeficientes da função, equação (13)	–
\dot{B}_F	Taxa de exergia química associada ao fluxo de combustível através da superfície de controle	kW
\dot{B}_P	Taxa de exergia das saídas úteis	kW
\dot{B}_Q	Taxa de exergia associada à transferência de calor	kW
\dot{B}_W	Taxa de exergia associada à realização de trabalho	kW
COP	Coeficiente de desempenho	–
c_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kgK
\dot{D}	taxa de destruição de exergia	kW
ECR	razão de conversão de energia	–
\dot{E}	taxa de fornecimento de energia através do combustível	kW
h	Entalpia específica	kJ/kg
\dot{I}	taxa de irreversibilidade	
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
\dot{m}_{ref}	Vazão mássica do orifício de referência	kg/s
P	Pressão absoluta	bar
q	Fração mássica de vapor ou título	–
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	kW
\dot{Q}_c	Taxa de produção de frio ou potência frigorífica	kW
\dot{Q}_n	Taxa de calor de rejeito não aproveitado	kW
\dot{Q}_r	Taxa de calor de rejeito recuperado	kW
\dot{Q}_g	Taxa de ganhos de calor do ambiente (perdas)	kW
R	Razão entre as demandas de potência elétrica e de frio	-
T	Temperatura absoluta	K

\bar{T}	Temperatura média	K
s	Entropia específica	kJ/kgK
s	Expoente dependente do grau de sub-resfriamento, equação (3.9)	–
\dot{W}	Taxa de trabalho fornecido ou potência elétrica	kW
\dot{W}_{\max}	Máxima potência realizada por um motor primário	kW
v	Volume específico	m ³ /kg
x	Concentração de amônia	–

Símbolos gregos

a	Razão de recuperação de energia do grupo motor térmico/gerador elétrico.	–
b	Razão de distribuição de produção de frio entre os <i>chillers</i> de absorção e de compressão de vapor	–
g	Razão percentual de demanda de potência elétrica.	–
d	Defeito de eficiência	–
Δ	Variação	–
e	Efetividade	–
e_m	Efetividade da transferência de massa	–
e_h	Efetividade da transferência de calor	–
h	Eficiência	–
q	Coefficiente de perdas	–
l	Razão de distribuição da carga entre os motores primários	–
m	Concentração de etilenoglicol no circuito de água gelada	–
j	Coefficiente de exergia de combustível	–
Φ	Relação de pressões	–
c	Razão de carga parcial do motor primário	–
y	Eficiência racional	–

Sub-índices e abreviaturas

<i>AC</i>	<i>Chiller</i> de absorção
<i>C</i>	Refrigeração
<i>CON</i>	Condensador
<i>cw</i>	Água gelada
<i>DE</i>	Demanda
<i>e</i>	Mistura água/etileno-glicol
<i>EG</i>	Gerador elétrico
<i>EVA</i>	Evaporador
<i>g</i>	Ganho de calor
<i>GB</i>	Volume de controle englobando toda a planta
<i>GEN</i>	Gerador
<i>HS</i>	Fonte de calor
<i>hw</i>	Água quente
<i>i</i>	Componente
<i>IC</i>	Motor de combustão interna
<i>in</i>	Entrada
<i>lim</i>	Limite
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>n</i>	Não recuperado
<i>nom</i>	Nominal
<i>out</i>	Saída
<i>PUMP</i>	Bomba
<i>Qc</i>	Relativo à demanda de frio
<i>r</i>	Recuperado
<i>REC</i>	Retificador
<i>RHE</i>	Trocador regenerador interno
<i>REJ</i>	Rejeitado
<i>sat</i>	Saturação
<i>sc</i>	Sub-resfriamento

<i>SCA</i>	Absorvedor regenerador (Resfriado pela solução forte)
<i>t</i>	Fonte de calor
<i>TO</i>	Total dos motores primários
<i>VC</i>	<i>Chiller</i> de compressão de vapor
<i>W</i>	Relativo à demanda de potência elétrica
<i>w</i>	Água
<i>WCA</i>	Absorvedor resfriado por água
<i>X</i>	Referente aos dados experimentais.