

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Frank Chaviano Pruzaesky**

**Análise de um Sistema de Produção  
Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor**

**Tese de Doutorado**

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

Orientadores: José Alberto dos Reis Parise  
Sérgio Leal Braga  
José Viriato Coelho Vargas

Rio de Janeiro, 25 de Agosto de 2005

**Frank Chaviano Pruzaesky**

## **Análise de um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor**

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

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

**Prof. Sérgio Leal Braga**

Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

**Prof. José Viriato Coelho Vargas**

Co-Orientador

Universidade Federal do Paraná

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomez**

Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

**Prof. Alcir de Faro Orlando**

Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

**Prof. Hélcio Rangel Barreto Orlando**

COPPE/UFRJ

**Prof. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira**

Universidade Católica de Petrópolis

**Profa. Gisele Maria Ribeiro Vieira**

Universidade Católica de Petrópolis

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Agosto de 2005

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

### **Frank Chaviano Pruzaesky**

É Engenheiro Mecânico formado pela Faculdade de Engenharia Mecânica do ISPJAE (*Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”*, La Habana, Cuba) e Mestre em Engenharia Mecânica na Área de Termociências pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atua nas áreas de energia e refrigeração.

#### Ficha Catalográfica

Pruzaesky, Frank Chaviano

Análise de um sistema de produção simultânea de eletricidade, frio e calor / Frank Chaviano Pruzaesky ; orientadores: José Alberto dos Reis Parise, Sérgio Leal Braga, José Viriato Coelho Vargas. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

286 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Trigerção. 3. Cogeração. 4. Motor de combustão interna. 5. Motor bi-combustível. 6. Bomba de calor. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Braga, Sérgio Leal. III. Vargas, José Viriato Coelho. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

À Digna, más de cien palabras, más de cien motivos...

## Agradecimentos

À minha família que sempre está do meu lado: À minha mãe, sem palavras. Ao meu padrasto, meus irmãos e meu pai, pelo apoio e carinho de sempre. À Niurka e Isabel, pelo carinho e incentivo. Às minhas tias, tios e primos, todos.

Aos meus amigos de “*Los Años Duros*”: Noli, Aniura, Evelio, Alejandro, Carlos, Amílcar, Raúl, Vilches, Caro, Jorge Milanés e família.

Aos meus amigos dos “*Tempos Modernos*”: Daniel, Ysrael e Marcinha, Danays, Vlado, Mauricio e Mariela, Epifanio, Camilo, Paulita, Sebastián e Karina, Mónica, Bruno, Gipsy, Maurício, Carlo, Mariana e Natacha, Bruna e Debbie. Ao Michel e à Fafá. Ao Jaime. À Gaúchada: Alexandre, Fernanda, Macarthy, Marcos, Fernando, Márcia. Ao Aldo. À Ranena.

Ao meu Orientador, Parise, pelo ensinamento, ajuda, incentivo, paciência e pelo apoio de sempre. Aos meus Co-Orientadores, Sérgio e Vargas, pelo apoio e incentivo.

Ao Dr Pablo Roque e aos professores da banca pelos conselhos e úteis sugestões para a elaboração do documento final.

Aos meus amigos do Laboratório de Termociências, do DEM, do ITUC e da PUC-Rio: Lourenço, Eduardo, Elizabet, José, Luis, Hugo, Melisa. À Juliana e a Jubs, Deborah, Thomas, Evemero, Gustavo, João, Ricardo, Carol e Ciça. Ao André, Roney, Erick, Edson. Ao Samuel, Joel, Mao, Yaneth, Teresa, Sygifredo, David, Milena. À Márcia, Rosely, Christiano, Carlúcio e Leninaldo, Marcos, Fada e Betty. À Vera, Eliane e Carmen. Ao “Gemada”, Wagner, Pascoal, Antônio Carlos. Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

À Aniura, a Danays e a Iliana pelas mudanças.

À Fernanda pela amizade, apoio e carinho.

Ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio financeiro.

## Resumo

Pruzaesky, F.C.; Parise, J. A. R.; Braga, S. L.; Vargas, J. V. C. **Análise de um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor.** Rio de Janeiro, 2005. 286p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A produção simultânea de energia elétrica, calor e frio, a partir da queima de combustível primário (trigeração), pode se mostrar como estratégia promissora do ponto de vista energético e de projeto, principalmente em indústrias como a química e a de alimentos. No presente trabalho descreve-se o estudo experimental de um sistema de produção de água gelada (“chiller”) com compressor hermético acionado eletricamente. Um motor a combustão interna, do tipo Diesel, foi convertido para operar com gás natural veicular (Diesel-gás) e aciona um gerador de eletricidade que supre a energia elétrica necessária ao funcionamento do “chiller” e ao atendimento de demanda elétrica pré-estabelecida. O resultante sistema de trigeração é, portanto, composto por dois sub-sistemas: a bomba de calor (“chiller”) e o conjunto motor-gerador. Calor de rejeito, do condensador do “chiller” e do sistema de arrefecimento e gases de exaustão do motor, é recuperado para a produção de água quente. O sistema é analisado à luz da 1ª e 2ª leis da Termodinâmica. As razões entre as demandas de frio, calor e eletricidade, as temperaturas de evaporação e de condensação da bomba de calor, e a razão de substituição de óleo Diesel por gás natural veicular são os principais parâmetros de controle dos resultados apresentados. Determinou-se, para o sistema em questão, uma taxa de substituição energética ótima do óleo Diesel por GNV de aproximadamente 25%, com uma economia de 11% a 15% (para geração de potência elétrica acima de 4,0 kW), fundamentada na diferença de preços entre os dois combustíveis e numa melhora do rendimento do motor para estas

condições de operação. Obteve-se a contribuição percentual de cada um dos produtos energéticos (frio, calor e eletricidade), em função do consumo de combustível, para as diferentes potências testadas, em função da taxa de substituição energética do óleo Diesel por GNV. Determinou-se, experimentalmente, a vazão de água nos diferentes componentes, para a qual se obtém uma máxima eficiência do sistema, quando analisado do ponto de vista exergetico.

### **Palavras-chave**

Trigeração, Cogeração, Motor de combustão interna, Motor bi-combustível, Bomba de calor.

## Abstract

Pruzaesky, F.C.; Parise, J. A. R.; Braga, S. L.; Vargas, J. V. C. **Analysis of a System for the Simultaneous Production of Electrical Energy, Heat and Cold.** Rio de Janeiro, 2005. 286p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The simultaneous production of electric energy, heat and cooling capacity from the primary fuel burning on a heat engine (trigeneration) can emerge as a promising strategy, from the energy and project points of view, mostly, in food and chemistry industries. The present work describes the experimental study of a vapor compression system for chilled water production. A Diesel internal combustion engine was converted to operate with natural gas (Diesel-gas) and drives an electric generator that supplies the necessary electric energy for the chiller's functioning and to attend the pre-established electric demand. The resultant system of trigeneration is, therefore, composed of two subsystems: the heat pump ("chiller") and the engine-generator group. Heat rejected from the condenser of "chiller" and from the cooling system and exhaust gases of the engine, is recovered for hot water production. The system is analyzed under the light of first and second laws of the Thermodynamics. The ratio between the cooling, heating and electricity demands, the temperatures of evaporation and condensation of the heat pump, and the Diesel-natural gas substitution ratio are main parameters of control of the presented results. The percentile contribution of cold, heat and electricity (on energetic fuel consumption basis), for the different electric energy generation rates, was obtained as a function of the energy substitution rate of the Diesel oil for natural gas. An optimal energy substitution rate of Diesel oil for natural gas of approximately 25% was determined with an economy rated between 11% and 15% (for electric energy generation rates above 4,0 kW), based both on the difference between prices of the two fuels and on the engine's

performance improvement for these operational conditions. An optimum water flow rate, from the exergetic point of view, was found for each component.

### **Keywords**

Tri-generation, Co-generation, Internal combustion engine, Dual-fuel engine, Heat pump.

# Sumário

Lista de Símbolos	23
1 Introdução	28
1.1. Cogeração	29
1.1.1. Cenário	32
1.1.2. Cogeração de eletricidade e aquecimento	34
1.1.3. Cogeração de eletricidade e refrigeração	37
1.2. Trigeração	38
1.2.1. Classificação dos sistemas de trigeração	40
1.2.2. Diferentes sistemas e capacidades	42
1.3. Critérios de avaliação e influência das políticas de incentivos	45
1.4. Perspectivas e tendências	47
1.5. Objetivos da tese	49
1.6. Conteúdo da tese	49
2 Aparato experimental	51
2.1. O sistema de trigeração	51
2.2. Descrição do sistema	54
2.2.1. O conjunto motor – gerador	54
2.2.2. O economizador (recuperador) de calor dos gases de exaustão	59
2.2.3. A bomba de calor	62
2.2.4. O painel de simulação e controle da carga elétrica	65
2.2.5. Tubulações	66
2.2.6. Isolamento térmico	66
2.3. Instrumentação da instalação experimental de trigeração	67
2.3.1. Instrumentação do motor	67
2.3.2. Medição de temperatura	71
2.3.3. Medição de pressão	72
2.3.4. Medição da potência elétrica	72

2.3.5. Aquisição de dados	73
2.3.6. Procedimento experimental	75
2.3.6.1. Planificação e objetivo dos testes	78
2.3.7. Procedimento de processamento e redução dos dados	80
3 Análise termodinâmica	82
3.1. Análise energética – 1ª lei da termodinâmica	82
3.1.1. Subsistema motor – gerador	84
3.1.1.1. Grupo moto – gerador	84
3.1.1.2. Arrefecimento do motor	87
3.1.1.3. Recuperação dos Gases (inclui análise de queima do Diesel e da mistura bi-combustível)	87
3.1.2. Subsistema bomba de calor	93
3.1.2.1. Compressor	94
3.1.2.2. Condensador	95
3.1.2.3. Válvula de expansão	96
3.1.2.4. Evaporador	97
3.1.2.5. COP de refrigeração e de aquecimento	98
3.1.2.6. Outros componentes do sistema	99
3.1.3. Análise de eficiência	102
3.1.3.1. Razão de Conversão de Energia – Cogeração	103
3.1.3.2. Razão de Conversão de Energia – Trigeração	107
3.2. Análise exergética – 2ª lei	112
3.2.1. Sistema Motor – Gerador	116
3.2.1.1. Grupo moto – gerador	116
3.2.1.2. Arrefecimento do Motor	117
3.2.1.3. Recuperação do calor dos Gases de exaustão	118
3.2.2. Bomba de Calor	118
3.2.2.1. Compressor	119
3.2.2.2. Condensador	120
3.2.2.3. Válvula de Expansão	121
3.2.2.4. Evaporador	122
3.2.2.5. Eficiência exergética de refrigeração e de aquecimento	123

3.2.3. Análise de Eficiência do sistema	124
3.2.3.1. Eficiência exergética – Cogeração	125
3.2.3.2. Eficiência exergética – Trigeração	125
4 Redução de dados e análise da propagação das incertezas das medições	127
4.1. Grupo Motor – Gerador e recuperação de calor dos gases de exaustão	128
4.1.1. Recuperação de calor dos gases de exaustão no economizador	134
4.1.2. Dados medidos e reduzidos no subsistema Motor – Gerador	135
4.2. Bomba de Calor	135
4.2.1. Compressor	136
4.2.2. Condensador	138
4.2.3. Válvula termostática de expansão	140
4.2.4. Evaporador	140
4.2.5. Vazão de refrigerante	141
4.2.6. Dados medidos e reduzidos na bomba de calor	142
4.3. Eficiência dos componentes e do sistema	143
4.3.1. Eficiências da bomba de calor	143
4.3.1.1. Coeficientes de desempenho ( <i>COP</i> )	143
4.3.1.2. Eficiência exergética (2ª lei)	144
4.3.2. Eficiência do sistema de cogeração	146
4.3.2.1. Eficiência Energética (1ª lei)	146
4.3.2.2. Eficiência exergética (2ª lei)	147
4.3.3. Eficiência do sistema de trigeração	148
4.3.3.1. Eficiência Energética (1ª lei)	148
4.3.3.2. Eficiência exergética (2ª lei)	148
5 Resultados	150
5.1. Bomba de calor	150
5.1.1. Condições de operação	151
5.1.2. Compressor	154
5.1.3. Condensador	159
5.1.4. Evaporador	161

5.1.5. Válvula de expansão termostática	165
5.1.6. Análise global de desempenho	167
5.1.6.1. 1ª lei da termodinâmica	168
5.1.6.2. 2ª lei da termodinâmica	171
5.2. Sistema (trigeração ou cogeração) operando com motor a Diesel puro	175
5.2.1. Cogeração	175
5.2.2. Trigeração	180
5.3. Substituição do óleo Diesel por <i>GNV</i>	183
5.3.1. Cogeração	192
5.3.2. Trigeração	199
5.4. Análise econômica da substituição do óleo Diesel por <i>GNV</i>	207
5.5. Redução do fluxo de ar	211
5.6. Otimização Experimental em trigeração – 2ª lei da termodinâmica	222
6 Conclusões e recomendações para futuros trabalhos	232
Bibliografia	237
Apêndice A 1 – Programas para pré-processamento dos dados.	247
Apêndice A 2 – Dados reduzidos dos testes da bomba de calor	263
Apêndice A 3 – Dados reduzidos dos testes do sistema de trigeração com substituição de óleo Diesel	267
Apêndice A 4 – Dados reduzidos dos testes de otimização exergética	280

## Lista de figuras

Figura 1 – Esquema de cogeração com ciclo Brayton (Hernández-Santollo e Sánchez-Cifuentes, 2003)	35
Figura 2 – Esquema de cogeração com ciclo Diesel (Agnew et al., 1999)	37
Figura 3 – Planta de trigerção baseada no ciclo Brayton e um “ <i>chiller</i> ” de absorção. Hernández-Santollo e Sánchez-Cifuentes (2003)	39
Figura 4 – Planta de trigerção na indústria de alimentos (esquema simplificado). Bassols et al. (2002)	43
Figura 5 – Planta de trigerção com motor de combustão interna a gás natural (esquema simplificado). Temir e Bilge (2004)	45
Figura 6 – Esquema da instalação experimental de trigerção	52
Figura 7 – Conjunto motor–gerador	54
Figura 8 – Esquema do sistema de subministro, medição da vazão volumétrica e injeção do <i>GNV</i>	56
Figura 9 – Regulador de pressão do <i>GNV</i>	56
Figura 10 – Sistema de alimentação e medição da vazão do óleo Diesel	58
Figura 11 – O economizador	59
Figura 12 – Características geométricas da serpentina	60
Figura 13 – Posicionamento do economizador, na descarga do motor	61
Figura 14 – Bomba de calor instrumentada para experiência	62
Figura 15 – Detalhamento esquemático da seção do sistema de trigerção, correspondente à bomba de calor	64
Figura 16 – Painel de controle e simulação de carga elétrica	65
Figura 17 – Sistema GO-POWER M-5000 para medição da vazão de ar no motor	68
Figura 18 – Representação esquemática do sistema de medição e injeção do óleo Diesel	68
Figura 19 – Medidor de vazão do <i>GNV</i> tipo turbina acoplado ao regulador de pressão do gás	70
Figura 20 – Representação esquemática da distribuição da energia no sistema de trigerção	83

Figura 21 – Representação do motor	84
Figura 22 – Representação do gerador	86
Figura 23 – Representação do economizador	88
Figura 24 – Representação do compressor	94
Figura 25 – Representação do condensador	95
Figura 26 – Representação do evaporador	97
Figura 27 – Representação do aquecedor (carga térmica)	100
Figura 28 – Representação do tanque de armazenamento do circuito de água fria	101
Figura 29 – Representação do tanque de armazenamento do circuito de água quente	102
Figura 30 – Fluxo de exergia em um sistema	114
Figura 31 – Exemplo de Diagrama de Sankey	115
Figura 32 – Esquema de medição do conjunto motor – gerador	128
Figura 33 – Gráfico e ajuste de curva do calor específico a pressão constante do ar	129
Figura 34 – Gráfico e ajuste de curva do calor específico a pressão constante da água	131
Figura 35 – Gráfico e ajuste de curva da incerteza do calor específico a pressão constante da água	132
Figura 36 – Gráfico e ajuste de curva da massa específica da água	133
Figura 37 – Esquema de medição do economizador	134
Figura 38 – Esquema de medição do compressor	136
Figura 39 – Influência das incertezas da temperatura e da pressão sobre a incerteza no cálculo da entalpia do refrigerante	137
Figura 40 – Esquema de medição do condensador	138
Figura 41 – Esquema de medição do evaporador	140
Figura 42 – Gráfico e ajuste de curva da entalpia específica da água	145
Figura 43 – Gráfico e ajuste de curva da entropia específica da água	145
Figura 44 – Gráfico e ajuste de curva da incerteza da exergia da água	146
Figura 45 – Faixa de variação das temperaturas de evaporação e condensação nos testes realizados	152
Figura 46 – Variação da temperatura ambiente ao longo dos testes	153

Figura 47 – Variação da temperatura de entrada da água no condensador ao longo dos testes	153
Figura 48 – Variação da temperatura de entrada da água no evaporador, ao longo dos testes	154
Figura 49 – Variação da vazão mássica de refrigerante com as temperaturas de evaporação e de condensação	155
Figura 50 – Variação da vazão mássica de refrigerante com a razão de pressão	155
Figura 51 – Incerteza no cálculo da vazão de refrigerante	156
Figura 52 – Variação da temperatura de descarga do compressor com as temperaturas de evaporação e de condensação	156
Figura 53 – Variação da temperatura de descarga do compressor com a razão de pressão	157
Figura 54 – Variação da eficiência isentrópica do compressor com as temperaturas de evaporação e de condensação	157
Figura 55 – Variação da potência elétrica consumida com as temperaturas de evaporação e de condensação	158
Figura 56 – Variação do trabalho específico do compressor com a razão de pressão	159
Figura 57 – Variação da temperatura de saída da água do condensador com a temperatura de evaporação	159
Figura 58 – Variação do grau de subresfriamento com a temperatura de evaporação, para duas diferentes cargas de refrigerante	160
Figura 59 – Variação da taxa de rejeição de calor no condensador com as temperaturas de evaporação e de condensação	161
Figura 60 – Variação da temperatura da água na saída do evaporador com a temperatura de evaporação	161
Figura 61 – Variação da capacidade frigorífica da bomba de calor com as temperaturas de evaporação e de condensação	162
Figura 62 – Variação do efeito refrigerante com as temperaturas de evaporação e de condensação	163
Figura 63 – Variação do grau de superaquecimento à saída do evaporador com a temperatura de evaporação	163

Figura 64 – Variação da queda de pressão no evaporador com a temperatura de evaporação	164
Figura 65 – Relação entre a pressão e a temperatura de evaporação	164
Figura 66 – (a) Válvula de expansão termostática (Dossat, 1961); (b) balanço de forças no diafragma da válvula	165
Figura 67 – Variação da característica da válvula com a temperatura de evaporação	166
Figura 68 – Variação do grau de superaquecimento com a característica da válvula ( $F_s/A$ )	167
Figura 69 – Variação do coeficiente de desempenho de refrigeração com as temperaturas de evaporação e de condensação	168
Figura 70 – Variação do coeficiente de desempenho de refrigeração com a diferença entre as temperaturas de evaporação e condensação	169
Figura 71 – Variação do coeficiente de desempenho de aquecimento com as temperaturas de evaporação e de condensação	169
Figura 72 – Variação do coeficiente de desempenho de aquecimento com a diferença entre as temperaturas de evaporação e condensação	170
Figura 73 – Taxa de destruição de exergia no compressor em função das temperaturas de evaporação e de condensação e do grau de subresfriamento à saída do condensador	171
Figura 74 – Variação da taxa de destruição de exergia no evaporador	172
Figura 75 – Variação da taxa de destruição de exergia na válvula de expansão	173
Figura 76 – Variação da taxa de destruição de exergia no condensador	173
Figura 77 – Variação da eficiência exérgica da bomba de calor com a temperatura de evaporação e condensação	174
Figura 78 – Temperatura de suprimento do óleo Diesel ao motor	175
Figura 79 – Consumo de combustível (óleo Diesel) em função da potência elétrica gerada	176
Figura 80 – <i>Linha de Willan</i> para uma rotação de 2100 rpm	177
Figura 81 – Balanço energético do motor, operando com óleo Diesel puro	178
Figura 82 – Razão de conversão de energia (recuperação total e caldeira auxiliar desligada)	178

Figura 83 – Eficiência exergetica do sistema de cogeraçao operando com óleo Diesel puro	179
Figura 84 – Taxa de variaçao da exergetia da água de recuperaçao em cada componente comparada à taxa de exergetia do combustivel	180
Figura 85 – Distribuicao energetica do sistema de trigeracao	180
Figura 86 – Razao de conversao de energia em funçao da potencia elétrica produzida	181
Figura 87 – Variaçao da eficiencia exergetica com a potencia elétrica gerada	182
Figura 88 – Variaçao da exergetia especifica da água para cada componente em funçao da potencia elétrica gerada e da exergetia do combustivel	182
Figura 89 – Condiçoes de operaçao cobertas na serie de testes relativa à substituicao de óleo Diesel por gás natural em termos de $\alpha_{GNV}$	183
Figura 90 – Condiçoes de operaçao cobertas na serie de testes relativa à substituicao de óleo Diesel por gás natural em termos de substituicao percentual mássica de óleo Diesel	184
Figura 91 – Condiçoes de operaçao cobertas na serie de testes relativa à substituicao de óleo Diesel por gás natural em termos da vazao mássica de gás natural	185
Figura 92 – Percentual de substituicao de óleo Diesel em funçao de $\alpha_{GNV}$	185
Figura 93 – Razao de substituicao de $GNV$ em funçao da vazao mássica de $GNV$	186
Figura 94 – Temperatura de entrada do gás natural para as diferentes condiçoes de operaçao	186
Figura 95 – Temperatura de entrada do óleo Diesel para as diferentes condiçoes de operaçao	187
Figura 96 – Eficiencia térmica do grupo motor – gerador em funçao de $\alpha_{GNV}$	187
Figura 97 – <i>Linha de Willan</i> para o motor operando com gás e óleo Diesel	188
Figura 98 – Temperatura dos gases de exaustao	189
Figura 99 – Variaçao da temperatura de saída da água de arrefecimento do motor com a potencia elétrica e a substituicao do gás natural	190
Figura 100 – Energia quantificada no balanço energético do conjunto motor - gerador	191

Figura 101 – Perdas não quantificadas no balanço energético do conjunto motor – gerador	192
Figura 102 – Distribuição de energia no conjunto motor – gerador para uma potência elétrica de 3,5 kW	193
Figura 103 – Distribuição de energia no conjunto motor – gerador para uma potência elétrica de 4,5 kW	193
Figura 104 – Distribuição de energia no conjunto motor – gerador para uma potência elétrica de 5,5 kW	194
Figura 105 – Distribuição de energia no conjunto motor – gerador para uma potência elétrica de 7,5 kW	194
Figura 106 – Razão de potência em função de $\alpha_{GNV}$	195
Figura 107 – Razão de conversão de energia em função de $\alpha_{GNV}$	196
Figura 108 – Eficiência exergetica em função de $\alpha_{GNV}$	196
Figura 109 – Balanço de energia do sistema operando em modo de cogeração – potência elétrica gerada: 4,5 kW	197
Figura 110 – Balanço de energia do sistema operando em modo de cogeração – potência elétrica gerada: 7,5 kW	197
Figura 111 – Contabilidade de exergia do sistema operando em modo de cogeração – potência elétrica gerada: 4,5 kW	198
Figura 112 – Contabilidade de exergia do sistema operando em modo de cogeração – potência elétrica gerada: 7,5 kW	198
Figura 113 – Distribuição de energia no sistema de trigeração para uma potência elétrica de 3,5 kW	199
Figura 114 – Distribuição de energia no sistema de trigeração para uma potência elétrica de 4,5 kW	200
Figura 115 – Distribuição de energia no sistema de trigeração para uma potência elétrica de 5,5 kW	200
Figura 116 – Distribuição de energia no sistema de trigeração para uma potência elétrica de 7,5 kW	201
Figura 117 – Aproveitamento de energia em função de $\alpha_{GNV}$	201
Figura 118 – Razão calor – frio do sistema	202
Figura 119 – Razão calor – potência elétrica do sistema	202

Figura 120 – Razão de conversão de energia em função de $\alpha_{GNV}$	203
Figura 121 – Eficiência exergética do sistema de trigeriação operando com óleo Diesel e <i>GNV</i>	204
Figura 122 – Balanço de energia do sistema operando em modo de trigeriação – potência elétrica gerada: 4,5 <i>kW</i>	204
Figura 123 – Balanço de energia do sistema operando em modo de trigeriação – potência elétrica gerada: 7,5 <i>kW</i>	205
Figura 124 – Contabilidade de exergia do sistema operando em modo de trigeriação – potência elétrica gerada: 4,5 <i>kW</i>	206
Figura 125 – Contabilidade de exergia do sistema operando em modo de trigeriação – potência elétrica gerada: 7,5 <i>kW</i>	206
Figura 126 – Razão de custo de operação para potência elétrica de 3,5 <i>kW</i>	207
Figura 127 – Razão de custo de operação para potência elétrica de 4,5 <i>kW</i>	208
Figura 128 – Razão de custo de operação para potência elétrica de 5,5 <i>kW</i>	208
Figura 129 – Razão de custo de operação para potência elétrica de 7,5 <i>kW</i>	209
Figura 130 – Razão de custo de operação para R\$1,47 / kg <i>GNV</i>	209
Figura 131 – Razão de custo de operação para R\$1,83 / kg <i>GNV</i>	210
Figura 132 – Razão de custo de operação para R\$2,20 / kg <i>GNV</i>	210
Figura 133 – Variação do coeficiente de substituição energética Diesel – gás com a potência elétrica	211
Figura 134 – Variação da temperatura de entrada do <i>GNV</i> ao longo dos testes	212
Figura 135 – Variação da temperatura de entrada do óleo Diesel ao longo dos testes	212
Figura 136 – Substituição mássica de óleo Diesel em função de $\alpha_{GNV}$	213
Figura 137 – Substituição energética de óleo Diesel	213
Figura 138 – Variação do excesso de ar com $\alpha_{GNV}$ para diferentes níveis de redução do fluxo de ar	214
Figura 139 – Distribuição de energia para 4,5 <i>kW</i> sem restrição no fluxo de ar	214
Figura 140 – Distribuição de energia para 4,5 <i>kW</i> com restrição de 17% no fluxo de ar	215
Figura 141 – Distribuição de energia para 4,5 <i>kW</i> com restrição de 25% no fluxo de ar	215

Figura 142 – Perdas não quantificadas no balanço de energia do conjunto motor – gerador	216
Figura 143 – Energia quantificada no balanço de energia do conjunto motor – gerador	216
Figura 144 – Perdas não quantificadas e substituição mássica de óleo Diesel em função de $\alpha_{GNV}$ , sem restrição no fluxo de ar	217
Figura 145 – Perdas não quantificadas e substituição mássica de óleo Diesel em função de $\alpha_{GNV}$ , com restrição de 17% no fluxo de ar	217
Figura 146 – Perdas não quantificadas e substituição mássica de óleo Diesel em função de $\alpha_{GNV}$ , com restrição de 25% no fluxo de ar	218
Figura 147 – Eficiência térmica do conjunto motor – gerador para diferentes níveis de redução de ar	218
Figura 148 – Razão de conversão de energia do sistema de trigeriação para diferentes níveis de redução de ar	219
Figura 149 – Eficiência exergética do sistema de trigeriação para diferentes níveis de redução de ar	220
Figura 150 – Razão de custo de operação para diferentes níveis de redução de ar (R\$ 1,47 / kg <i>GNV</i> )	220
Figura 151 – Razão de custo de operação para diferentes níveis de redução de ar (R\$ 1,83 / kg <i>GNV</i> )	221
Figura 152 – Razão de custo de operação para diferentes níveis de redução de ar (R\$ 2,20 / kg <i>GNV</i> )	221
Figura 153 – Variação da temperatura ambiente ao longo dos testes	222
Figura 154 – Variação da temperatura de entrada da água no condensador ao longo dos testes	223
Figura 155 – Variação da eficiência exergética com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor	224
Figura 156 – Variação da eficiência exergética com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor	224
Figura 157 – Variação da razão de conversão de energia com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor	225
Figura 158 – Variação da razão de conversão de energia com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor	226

Figura 159 – Variação da eficiência exergética com as vazões mássicas de água, no evaporador (extrapolada à vazão nula) e no motor	227
Figura 160 – Variação da razão de conversão de energia com as vazões mássicas de água, no evaporador (extrapolada à vazão nula) e no motor	227
Figura 161 – Variação da eficiência exergética com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor, extrapoladas à vazão nula	228
Figura 162 – Variação da eficiência exergética com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor, extrapoladas à vazão nula	229
Figura 163 – Variação da razão de conversão de energia com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor, extrapoladas à vazão nula	229
Figura 164 – Variação da razão de conversão de energia com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor, extrapoladas à vazão nula	230
Figura 165 – Variação da eficiência exergética do sistema de trigeriação com as vazões mássicas de água, no evaporador e no motor, apresentando ponto ótimo	231

## Lista de Símbolos

$C:$	(capacidade térmica) produto $\dot{m} c_p$ do fluido no trocador de calor (kW/K)
$C:$	fração mássica de carbono relativa à massa total de combustível ( $kg/kg_f$ )
$c_p:$	calor específico a pressão constante (kJ/kgK)
$COP:$	coeficientes de desempenho (-)
$DFPU:$	unidade de potência da mistura bi-combustível
$d:$	exergia destruída (kJ/kg)
$\dot{E}:$	potência elétrica (kJ/kg)
$ECR:$	razão de conversão de energia (-)
$e:$	exergia específica (kJ/kg)
$G:$	quantidade total de mistura combustível fresca ( $kg/kg_f$ )
$H:$	fração mássica de hidrogênio relativa à massa total de combustível ( $kg/kg_f$ )
$H_{inf}:$	poder calorífico inferior equivalente (kW)
$\dot{H}_f:$	consumo energético equivalente de combustível (kW)
$H_f:$	poder calorífico inferior equivalente de combustível (kJ/kg)
$H_{DF}^*:$	poder calorífico inferior referido a uma DFPU (kW)
$h:$	entalpia específica (kJ/kg)
$I:$	intensidade da corrente elétrica (A)
$i:$	irreversibilidade do sistema (kJ/kg)
$L:$	exergia das perdas (kJ/kg)
$l:$	massa de ar (kg)

$l_o$ :	massa teórica de ar necessária para a combustão de 1 kg de combustível (kg)
$m$ :	massa (kg)
$\dot{m}$ :	vazão mássica (kg/s)
$n$ :	coeficiente de equivalência energética do combustível secundário em relação ao primário (-)
$n^{\circ}$ :	taxa de substituição do Diesel (-)
$O$ :	fração mássica de oxigênio relativa à massa total de combustível ( $kg/kg_f$ )
$P$ :	potência (kW)
$p$ :	pressão (kPa)
$\dot{Q}$ :	taxa de transferência de calor (kW)
$q$ :	contribuição térmica do combustível em uma combustão com dois combustíveis (-)
$q$ :	calor por unidade de massa (kJ/kg)
$R$ :	relação de demandas da instalação (-)
$RP\%$	razão de potência ou contribuição energética de um componente do sistema
$R_{CH}$ :	razão entre a demanda de calor e de frio em um sistema de trigeração (-)
$R_{EC}$ :	razão entre a demanda elétrica e de frio em um sistema de trigeração (-)
$R_{EH}$ :	razão entre a demanda elétrica e de calor em um sistema de cogeração (-)
$s$ :	entropia específica (kJ/kgK)
$T$ :	temperatura (K)
$t$ :	tempo (s)
$U$ :	energia interna (kJ)
$UA$ :	coeficiente global de transferência de calor (kW/K)
$u$ :	energia interna específica (kJ/kg)
$V$ :	tensão elétrica (Volt)
$v$ :	volume específico ( $m^3/kg$ )
$\dot{W}_{CP}$ :	taxa de trabalho de compressão (kW)

### Símbolos Gregos:

$\alpha$ :	coeficiente de excesso de ar (-)
$\Gamma$ :	coeficiente de desempenho global de um componente
$\Delta e$	variação de exergia específica (kJ/kg)
$\Delta T$	diferença de temperaturas (K)
$\Delta T_{saq}$ :	grau de superaquecimento do evaporador (K)
$\Delta T_{sub}$ :	grau de subresfriamento do condensador (K)
$\varphi$ :	ângulo de defasagem (voltagem $\times$ corrente)
$\eta$ :	eficiência
$\varepsilon$ :	efetividade (trocadores de calor)

### Subscritos:

$AQ$ :	aquecedor (carga térmica)
$a$ :	ar
$ao$ :	ambiente
$aqc$ :	referente ao aquecimento
$CA$ :	caldeira auxiliar
$CD$ :	condensador
$CP$ :	compressor
$cogen$ :	cogeração
$comp$ :	compressão
$cond$ :	condensação
$DEX$ :	dispositivo de expansão
$Df$ :	combustível óleo Diesel
$Diesel$ :	óleo Diesel
$dem$ :	demanda
$dual\ fuel$ :	óleo Diesel + gás natural
$EC$ :	economizador
$EG$ :	motor
$EV$ :	evaporador
$ele$ :	elétrico
$evap$ :	evaporador

<i>f</i> :	combustível
<i>f<sub>i</sub></i> :	referente ao combustível no ponto “i”
<i>GE</i> :	gerador elétrico
<i>GNV</i> :	gás natural veicular
<i>g</i> :	gases de exaustão
<i>g<sub>i</sub></i> :	referente aos gases de exaustão no ponto “i”
<i>H<sub>2</sub>O</i> :	água
<i>I</i> :	referente às análises da 1ª Lei da Termodinâmica
<i>II</i> :	referente às análises da 2ª Lei da Termodinâmica
<i>k</i> :	cinética
<i>k</i> :	condensação
<i>l</i> :	perdas
<i>l</i> :	evaporação
<i>load</i> :	demanda
<i>min</i> :	mínimo (trocadores de calor)
<i>N<sub>2</sub></i> :	nitrogênio
<i>NFS</i> :	sistema estacionário
<i>O</i> :	ambiente
<i>O<sub>2</sub></i> :	oxigênio
<i>PF</i> :	combustível primário
<i>p</i> :	propriedade a pressão constante
<i>p</i> :	potencial
<i>quim</i> :	química
<i>r</i> :	refrigerante (R-22)
<i>rec</i> :	recuperado
<i>ref</i> :	referente à refrigeração
<i>ri</i> :	referente ao refrigerante no ponto <i>i</i> do esquema da figura 15
<i>SF</i> :	combustível secundário
<i>saq</i> :	superaquecimento
<i>simple fuel</i> :	somente óleo Diesel
<i>TF</i> :	tanque frio
<i>TQ</i> :	tanque quente
<i>TR</i> :	transmissão motor-gerador
<i>th</i> :	teórico

<i>trigen:</i>	trigeração
<i>v:</i>	propriedade a volume constante
<i>w:</i>	água
<i>wa:</i>	água quente no aquecedor (carga térmica)
<i>wc:</i>	água do condensador
<i>wd:</i>	água para dreno do tanque quente
<i>we:</i>	água do evaporador
<i>wi:</i>	referente à água no ponto “i” correspondente
<i>wm:</i>	água de arrefecimento do motor
<i>wr:</i>	água de reposição do tanque quente
<i>x:</i>	referente a um componente ou sistema genérico