



Eduardo Ferreira Ramos

**Análise do desempenho de um sistema de
cogeração com uma microturbina a gás natural**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientadores: Alcir de Faro Orlando
Carlos Eduardo Reuther de Siqueira



Eduardo Ferreira Ramos

**Análise do desempenho de um sistema de
cogeração com uma microturbina a gás natural**

Dissertação de Mestrado

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

Prof. Alcir de Faro Orlando

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Co-Orientador

Universidade Católica de Petrópolis

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Eloi Fernández y Fernández

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Washington Braga Filho

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de março de 2007

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

Eduardo Ferreira Ramos

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela UCP (Universidade Católica de Petrópolis) em 2004. Técnico em Desenho Mecânico pelo SENAI-RJ-Petrópolis, 1994. Interesse acadêmico nas áreas de Energia e Petróleo.

Ficha Catalográfica

Ramos, Eduardo Ferreira

Análise do desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural / Eduardo Ferreira Ramos ; orientadores: Alcir de Faro Orlando, Carlos Eduardo Reuther de Siqueira. – 2007.
174 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. Microturbina. 4. Trocador de calor. 5. Efetividade. 6. Viabilidade técnica e econômica. 7. Energia. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Siqueira, Carlos Eduardo Reuther de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A Deus,
pela sabedoria e coragem concedidas.
Aos meus pais José (in memorian) e Maria.

Agradecimentos

A Deus e ao grande Mestre Jesus Cristo por tudo.

À minha mãe, a meus irmãos, sobrinhas,... a todos os meus familiares.

Ao Professor Alcir, pelo ensinamento, dedicação e paciência.

Ao Professor Carlos Reuther, pelo incentivo e ensinamento.

Aos amigos Evemero, Gustavo, João, Marcelo, Marlon e Edgardo por toda ajuda.

Aos meus amigos Fábio, Ranena, André, Júlio, Angélica, Sully, Hugo, Teresa, Raul, Shirley, Miguel, David, José, Joana, Carlos, Abel, André, Frank, Hernan, Paulo, Aldo, Henriete, Christiano, Luciano, Amanda, Fernando, Sandro, Otávio e a todos que compartilharam comigo direta e indiretamente.

À Rosely, Carolina, Márcia, aos Professores da Engenharia Mecânica.

Ao Laboratório de Engenharia Civil, à Prefeitura da PUC-Rio.

Ao Departamento de Educação Física, ao Professor Renato, Orlando e Elias.

À minha família “carioca”: Dona Ana, Elvídio e Rômulo pela amizade, ajuda e convívio.

À ANEEL e LIGHT.

À CAPES e CNPq pela ajuda financeira.

Resumo

Ramos, E. F.; Orlando, A. F.; Siqueira, C. E. R. **Análise do desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural**. Rio de Janeiro, 2007. 174p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação foi feita uma simulação do desempenho de um sistema de cogeração, a partir de dados experimentais obtidos com uma microturbina a gás natural com 30 kW de potência nominal, operada no horário de ponta, e acoplada com uma unidade recuperadora de calor e um reservatório térmico para fornecimento de água quente de consumo nos chuveiros do Ginásio da PUC-Rio. Inicialmente, o desempenho do sistema de cogeração foi medido para várias condições de operação, mostrando que a eficiência de geração de energia elétrica é inferior à que o fabricante declara (16,6%). O aproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão é de 29,1% para plena carga e 46,3% para 25% de carga. Nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia para calcular a efetividade da unidade recuperadora de calor. A simulação realizada teve como objetivos o melhor conhecimento do comportamento do sistema de cogeração para diferentes vazões de água de consumo e da sua temperatura de armazenamento determinando-se o maior valor da vazão para que uma temperatura de 40°C nos chuveiros fosse mantida. A equação da energia em relação ao tempo foi resolvida numericamente, modelando-se o desempenho de cada componente, para estimar a temperatura da água do reservatório de armazenamento em função do tempo, para diferentes cargas elétrica e térmica. Os resultados indicaram as condições para o melhor aproveitamento de energia térmica e sua viabilidade econômica, inclusive quanto à relação entre o horário de geração e o consumo da energia térmica armazenada.

Palavras-chave

Cogeração; microturbina; trocador de calor; efetividade; viabilidade técnica e econômica; energia.

Abstract

Ramos, E. F.; Orlando, A. F.; Siqueira, C. E. R. **Performance analysis of a gas fired microturbine based cogeneration system**. Rio de Janeiro, 2007. 174p. Dissertation (M.Sc.) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation the performance of a cogeneration system was simulated using data obtained in tests of a natural gas fired 30 kW microturbine, operated during peak hours, and coupled to a heat recovery unit to generate hot water to be consumed in the showers of the PUC-Rio Gymnasium, together with a thermal reservoir to match the demand. Initially, the performance of the cogeneration system was measured at different operating conditions, showing that the electric energy generation efficiency is smaller than what is declared by the manufacturer (16,6%). The heat recovery from the exhaust gases was measured as 29,1% for full load operation and 46,3% for 25% load operation. In this dissertation a methodology was developed for calculating the effectiveness of the heat recovery unit. The performance simulation was aimed to better understand the behaviour of the cogeneration system for different water consumption rates and its storage temperature, determining the maximum allowed value so that the shower water temperature be at least 40°C. The timewise energy equation was numerically solved, using the modelled performance of each component, to estimate the storage reservoir water temperature as a function of time, for different electric and thermal energy loads. The results indicated the conditions for better thermal energy usage and its economic feasibility, including the relationship between generation hours and the stored thermal energy consumption.

Keywords

Cogeneration; microturbine; heat exchanger; effectiveness; technical and economic feasibility ; energy.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras | 12 |
| Lista de Tabelas | 14 |
| Abreviaturas e Siglas | 15 |
| Lista de símbolos | 15 |
| | |
| 1. Introdução | 21 |
| 1.1 Cogeração | 22 |
| 1.2 Estado da arte das tecnologias atuais em sistema de cogeração | 25 |
| 1.2.1 Sistemas baseados em motores de combustão interna | 25 |
| 1.2.2 Sistemas baseados em célula de combustível | 26 |
| 1.2.3 Sistemas baseados em motor Stirling | 26 |
| 1.2.4 Trigeração | 27 |
| 1.3 Descrição tecnológica | 27 |
| 1.3.1 Microturbina | 27 |
| 1.3.2 Unidade recuperadora de calor | 28 |
| 1.3.3 Reservatório térmico (Boiler) | 29 |
| 1.4 Análise do problema | 29 |
| 1.5 Objetivo | 30 |
| 1.6 Estrutura da dissertação | 31 |
| | |
| 2. Fundamentos Teóricos | 32 |
| 2.1 Análise do sistema de cogeração | 32 |
| 2.2 Turbina a gás | 32 |
| 2.3 Ciclo Brayton | 34 |
| 2.4 Ciclo simples de turbina a gás regenerativo | 36 |
| 2.5 Temperatura adiabática da chama | 38 |
| 2.6 Processo de combustão | 38 |
| 2.6.1 Mistura de gases perfeitos | 39 |
| 2.6.2 Ar teórico e Relação ar-combustível | 39 |
| 2.7 Compressor | 40 |
| 2.7.1 Análise termodinâmica do compressor | 41 |
| 2.8 Câmara de combustão | 43 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.9 | Turbina | 44 |
| 2.9.1 | Análise termodinâmica da turbina | 45 |
| 2.10 | Análise da microturbina | 47 |
| 2.11 | Análise do trocador de calor | 48 |
| 2.11.1 | Análise pela Diferença da temperatura média logarítmica (DTML) | 49 |
| 2.11.2 | Análise pelo método ε -NUT | 49 |
| 2.12 | Análise global do sistema | 51 |
| 2.12.1 | Fundamentos da cogeração | 51 |
| 2.12.2 | Heat rate | 52 |
| 2.13 | Análise de incertezas | 53 |
| 2.14 | Método numérico – Método de Runge-Kutta | 53 |
| 3. | Procedimento experimental | 54 |
| 3.1 | Descrição do teste | 54 |
| 3.2 | Medição dos parâmetros de energia elétrica | 58 |
| 3.3 | Medição de vazão – Gás natural e Água de circulação | 58 |
| 3.4 | Medição de vazão – Água de consumo | 61 |
| 3.5 | Medição de vazão – Ar (gases) na URC | 62 |
| 3.6 | Medição de temperatura | 63 |
| 3.7 | Medição de pressão | 66 |
| 3.8 | Medição de emissão dos gases | 67 |
| 3.9 | Medição do fluxo de massa de ar e razão ar/combustível | 68 |
| 3.10 | Sistema de aquisição de dados | 69 |
| 4. | Metodologia de teste | 71 |
| 4.1 | Análise da Viabilidade Econômica | 71 |
| 4.2 | Análise de desempenho do sistema de cogeração | 72 |
| 4.2.1 | Análise de desempenho da produção de energia elétrica | 72 |
| 4.2.1.1 | Desempenho da produção de energia elétrica | 73 |
| 4.2.1.2 | Produção de potência elétrica | 74 |
| 4.2.1.3 | Produção de calor de entrada “heat input” (HI) | 74 |
| 4.2.1.4 | Eficiência elétrica | 75 |
| 4.2.1.5 | Desempenho da qualidade da energia elétrica | 75 |
| 4.2.1.5.1 | Frequência elétrica de saída | 76 |
| 4.2.1.5.2 | Tensão elétrica de saída | 77 |
| 4.2.1.6 | Taxa de calor recuperado | 77 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.1.7 | Eficiência térmica | 78 |
| 4.2.1.8 | Taxa de calor disponível da microturbina | 79 |
| 4.2.1.9 | Taxa de calor utilizado na URC | 80 |
| 4.3 | Taxa de emissão de gases | 80 |
| 4.4 | Balanço da combustão | 81 |
| 4.5 | Determinação do PCI do gás natural | 81 |
| 4.6 | Análise da Unidade recuperadora de calor | 82 |
| 4.6.1 | Determinação da efetividade da URC | 82 |
| 4.6.2 | Razão ar-combustível (AC) da microturbina | 82 |
| 4.6.3 | Rampa de aquecimento do sistema de cogeração | 83 |
| 4.7 | Análise de incertezas | 83 |
| 4.7.1 | Incerteza na Potência Elétrica (U_P) | 84 |
| 4.7.2 | Incerteza na Energia do combustível ($U_{Q_{form}}$) | 85 |
| 4.7.3 | Incerteza no PCI do GN (U_{PCI}) | 86 |
| 4.7.4 | Incerteza na eficiência elétrica ($U_{\eta_{el}}$) | 86 |
| 4.7.5 | Incerteza na frequência elétrica (U_F) | 86 |
| 4.7.6 | Incerteza na tensão elétrica (U_V) | 87 |
| 4.7.7 | Incerteza na taxa de recuperação de calor ($U_{\dot{Q}_{rec}}$) | 87 |
| 4.7.8 | Incerteza na eficiência térmica ($U_{\eta_{term}}$) | 88 |
| 4.7.9 | Incerteza na taxa de calor disponível da microturbina ($U_{\dot{Q}_{disp}}$) | 89 |
| 4.7.10 | Incerteza na taxa de calor utilizado na URC ($U_{\dot{Q}_{util}}$) | 90 |
| 4.7.11 | Incerteza da efetividade da URC (U_{ϵ}) | 90 |
| 5. | Simulação do sistema de cogeração | 93 |
| 5.1 | Simulação do sistema de cogeração sem consumo – modelo 1 | 94 |
| 5.2 | Simulação do sistema de cogeração com consumo – modelo 2 | 95 |
| 6. | Resultados | 99 |
| 6.1 | Avaliação dos resultados | 99 |
| 6.2 | Desempenho da produção de Potência elétrica e Taxa de 100 calor | |
| 6.2.1 | Teste de cargas parciais – controlado | 100 |
| 6.2.2 | Desempenho da microturbina com carga de 100% (28 kW) | 107 |
| 6.2.3 | Desempenho da qualidade da energia elétrica | 109 |
| 6.2.3.1 | Desempenho da frequência elétrica | 109 |
| 6.2.3.2 | Desempenho da tensão elétrica | 110 |

| | | |
|--------------------|--|------------|
| 6.2.3.3 | Desempenho da Partida a frio da microturbina | 111 |
| 6.2.4 | Desempenho do sistema de cogeração – teste livre | 112 |
| 6.2.5 | Validação da simulação numérica | 120 |
| 6.2.6 | Simulação do desempenho da cogeração como função do consumo | 122 |
| 6.2.6.1 | Simulação do desempenho da cogeração – 1º Caso | 124 |
| 6.2.6.2 | Simulação do desempenho da cogeração – 2º Caso | 125 |
| 6.2.7 | Análise da viabilidade do uso da cogeração | 127 |
| 7. | Conclusões | 135 |
| | Referências Bibliográficas | 137 |
| Apêndice 1 | Análise da Viabilidade Econômica da cogeração no horário de ponta - 2004 | 141 |
| Apêndice 2 | Isométrico do Sistema de Cogeração – PUC-Rio | 143 |
| Apêndice 3 | Curva do Sistema | 144 |
| Apêndice 4 | Cálculo das propriedades do ar | 145 |
| Apêndice 5 | Cálculo das propriedades da água | 146 |
| Apêndice 6 | Algoritmo da simulação numérica - MatLab | 148 |
| Apêndice 7 | Composição e massa molecular do gás natural | 151 |
| Apêndice 8 | Cálculo de incerteza do PCI do gás natural | 152 |
| Apêndice 9 | Desempenho do sistema de cogeração – Teste controlado | 153 |
| Apêndice 10 | Transferência de calor - sistema de cogeração | 159 |
| Apêndice 11 | Gráfico – T_{g_s} x T_{g_e} | 162 |
| Apêndice 12 | Cogeração: Simulação real e numérica | 163 |
| Apêndice 13 | Cogeração: Simulação numérica – 1º Caso | 165 |
| Anexo 1 | Microturbina C30 – Especificações técnicas | 169 |
| Anexo 2 | Especificações técnicas: Unidade recuperadora de calor (URC) e Reservatório térmico (Boiler) | 171 |
| Anexo 3 | Método numérico – Método de Runge-Kutta | 172 |
| Anexo 4 | Calor específico à pressão constante de vários gases perfeitos em função da temperatura. | 173 |
| Anexo 5 | Valores de t-student para diferentes níveis de confiabilidade | 174 |

Lista de Figuras

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figura 1: | Diagrama de um sistema de cogeração | 22 |
| Figura 2: | Ciclo topping | 23 |
| Figura 3: | Ciclo bottoming | 24 |
| Figura 4: | Diagrama Ciclo Combinado - Turbina a gás e a vapor | 25 |
| Figura 5: | Detalhe da Microturbina C30 Capstone® | 27 |
| Figura 6: | Diagrama de uma Turbina a gás de ciclo simples | 33 |
| Figura 7: | Diagramas Pressão vs Volume e Temperatura vs Entropia | 34 |
| Figura 8: | Ciclo aberto e ciclo fechado – Turbina a gás | 35 |
| Figura 9: | Eficiência vs Trabalho específico da Turbina a gás | 35 |
| Figura 10: | Diagrama T x s – Ciclo real | 36 |
| Figura 11: | Ciclo regenerativo da turbina a gás | 37 |
| Figura 12: | Variação da razão de pressão de um compressor centrífugo | 43 |
| Figura 13: | Variação da eficiência isentrópica de um compressor centrífugo | 43 |
| Figura 14: | Família de curvas de performance da turbina | 46 |
| Figura 15: | Conjunto compressor/turbina Microturbina Capstone | 47 |
| Figura 16: | Diagrama esquemático de uma microturbina a gás | 48 |
| Figura 17: | Ciclo de Carnot | 51 |
| Figura 18: | Ginásio de esportes – PUC-Rio | 54 |
| Figura 19: | Sistema de cogeração com microturbina a gás natural | 55 |
| Figura 20: | Diagrama do sistema de cogeração | 56 |
| Figura 21: | Sistema de cogeração - chuveiro | 56 |
| Figura 22: | Esquema da instrumentação do sistema de cogeração | 57 |
| Figura 23: | Software CRMS e Interface RS-232 | 58 |
| Figura 24: | Curva de calibração do SVTG | 59 |
| Figura 25: | Instrumentação – vazão, temperatura e pressão do gás natural | 60 |
| Figura 26: | Curva de calibração do SVTL | 60 |
| Figura 27: | Instrumentação – vazão e temperatura da água | 61 |
| Figura 28: | Instrumentação - volume - consumo de água quente | 62 |
| Figura 29: | Bocal e duto de extensão para o escoamento Gases da exaustão | 62 |
| Figura 30: | Sonda (Pitot) - velocidade do gás | 63 |
| Figura 31: | Instrumentação – temperatura dos gases de exaustão | 64 |
| Figura 32: | Multímetro digital portátil | 65 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Figura 33: | Curva de calibração do Transdutor de pressão | 66 |
| Figura 34: | Analizador de gás – teste 350 X/ML | 67 |
| Figura 35: | Multímetro digital multicanal | 69 |
| Figura 36: | Esquema de ligação dos sensores - Sistema de aquisição de dados | 70 |
| Figura 37: | Diagrama do sistema de cogeração – simulação | 94 |
| Figura 38: | Diagrama do consumo de água quente – simulação | 96 |
| Figura 39: | Diagrama modelo para as perdas de calor no sistema (UA efetivo) | 97 |
| Figura 40: | Potência elétrica e Taxa de calor recuperado - Teste controlado | 104 |
| Figura 41: | Eficiências elétrica, térmica e total - Teste controlado | 105 |
| Figura 42: | Perfis de temperatura dos gases de exaustão e da água Teste controlado | 106 |
| Figura 43: | Potência elétrica vs Temperatura Ambiente | 107 |
| Figura 44: | Eficiência elétrica vs Temperatura Ambiente | 108 |
| Figura 45: | Desempenho da frequência elétrica | 109 |
| Figura 46: | Desempenho da tensão elétrica | 110 |
| Figura 47: | Desempenho da partida a frio da microturbina C30 | 111 |
| Figura 48: | Perfil da Temperatura de entrada e saída da água e Efetividade na URC - Teste 28 kW | 112 |
| Figura 49: | UA efetivo vs tempo – Teste 28 kW | 114 |
| Figura 50: | Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 28 kW | 115 |
| Figura 51: | Perfil da Temperatura de entrada e saída da água e Efetividade na URC - Teste 21 kW | 116 |
| Figura 52: | Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 21 kW | 116 |
| Figura 53: | Perfil da Temperatura de entrada e saída da água e Efetividade na URC - Teste 14 kW | 117 |
| Figura 54: | Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 14 kW | 118 |
| Figura 55: | Perfil da Temperatura de entrada e saída da água e Efetividade na URC - Teste 7 kW | 118 |
| Figura 56: | Perfil das Taxas de calor na cogeração – Teste 7 kW | 119 |
| Figura 57: | Simulação numérica – Teste 28 kW Temperatura da água vs Tempo | 122 |
| Figura 58: | Simulação numérica 1–Função do consumo Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo | 123 |
| Figura 59: | Simulação numérica 2–Função do consumo Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo | 123 |
| Figura 60: | Cogeração simulação – 1º Caso Temperatura da água vs Tempo | 124 |
| Figura 61: | Cogeração simulação – 1º Caso Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo | 125 |
| Figura 62: | Cogeração simulação – 2º Caso Temperatura da água vs Tempo | 126 |
| Figura 63: | Cogeração simulação – 2º Caso Temperatura da água / Fluxo de massa / Taxa de Calor vs Tempo | 126 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Tabela 1: | Condição Padrão – ISO 2314: 1989 | 33 |
| Tabela 2: | Especificação dos sensores internos da microturbina C30 | 58 |
| Tabela 3: | Características do medidor de vazão tipo turbina - Gás | 59 |
| Tabela 4: | Características do medidor de vazão tipo turbina – Líquido | 60 |
| Tabela 5: | Características do hidrômetro e cronômetro | 61 |
| Tabela 6: | Características da sonda (Pitot) e paquímetro | 63 |
| Tabela 7: | Coeficientes da Equação de Callendar – Van Dusen | 64 |
| Tabela 8: | Características dos sensores de temperatura | 65 |
| Tabela 9: | Características do Multímetro digital – Temperatura | 65 |
| Tabela 10: | Características do transdutor de pressão | 66 |
| Tabela 11: | Características do analisador de gás | 68 |
| Tabela 12: | Características do Multímetro digital multicanal | 69 |
| Tabela 13: | Resumo do Sistema de aquisição | 69 |
| Tabela 14: | Limites de aceitação para os parâmetros operacionais | 73 |
| Tabela 15: | Divisores para distribuição de probabilidade - (95,45% de nível de confiança) | 84 |
| Tabela 16: | Tabela de incertezas dos instrumentos | 91 |
| Tabela 17: | Cronograma de teste – Cargas individuais | 99 |
| Tabela 18: | Parâmetros da cogeração | 99 |
| Tabela 19: | Composição e propriedades do gás natural | 101 |
| Tabela 20: | Variabilidade dos parâmetros operacionais | 102 |
| Tabela 21: | Desempenho do sistema de cogeração – Produção de energia elétrica e calor | 103 |
| Tabela 22: | Tabela comparativa de parâmetros – Microturbina C30 | 108 |
| Tabela 23: | Parâmetros da frequência elétrica – Microturbina C30 | 110 |
| Tabela 24: | Parâmetros da tensão elétrica – Microturbina C30 | 111 |
| Tabela 25: | Parâmetros UA_1 e \dot{Q}_{perdas_circ} | 120 |
| Tabela 26: | Parâmetros para simulação numérica | 120 |
| Tabela 27: | Resumo das tarifas: ANEEL / LIGHT | 127 |
| Tabela 28: | Resumo das tarifas: CEG | 127 |
| Tabela 29: | Estudo de Viabilidade Econômica – 1º Caso | 129 |
| Tabela 30: | Estudo de Viabilidade Econômica – 2º Caso | 131 |
| Tabela 31: | Tabela 31 – Tabela comparativa - Percentual de energia térmica | 133 |

Abreviaturas e Siglas

| | |
|---------|---|
| AC | Corrente Alternada |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| CEG | Companhia Distribuidora de Gás do Rio de Janeiro |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| ISO | International Standards Organization |
| LPT-PUC | Laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| MT | Microturbina |
| PUC-Rio | Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro |
| URC | Unidade recuperadora de calor |
| VDC | Tensão de Corrente Contínua |

Lista de Símbolos

| | |
|-------|--|
| A | Área, m^2 |
| A | Coeficiente de ajuste – PT-100, $^{\circ}C^{-1}$ |
| AC | Razão ar-combustível |
| B | Coeficiente de ajuste – PT-100, $^{\circ}C^{-2}$ |
| c | Calor específico, $kJ/kg\ K$, $kJ/kmol\ K$ |
| C | Taxa de Capacidade térmica, $kJ/s\ K$ |
| COG | Cogeração |
| D | Diâmetro, m |
| F | Frequência elétrica, Hz |
| g | Aceleração da gravidade, m/s^2 |
| Gr | Número de Grashof |
| h | Entalpia específica, kJ/kg |
| h | Incremento de tempo, min |

| | |
|----------------|---|
| h | Coeficiente de transferência de calor, $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ |
| HR | Heat rate, kJ/kWh |
| I | Corrente elétrica, A |
| k | Fator de abrangência |
| k | Razão do calor específico a pressão constante com o de volume constante |
| k | Coeficiente de condutividade térmica, $\text{W/m }^\circ\text{C}$ |
| m | Massa, kg |
| \dot{m} | Fluxo de massa, kg/s |
| M | Massa molecular, mol |
| n | Número de mol |
| N | Número de medições |
| Nu | Número de Nusselt |
| p | Pressão, kPa |
| P | Potência elétrica, kW |
| PCI | Poder calorífico Inferior, kJ/Nm^3 |
| PCS | Poder calorífico Superior, kJ/Nm^3 |
| ppmvd | Partes por milhão por volume seco |
| Pr | Número de Prandtl |
| Q | Calor, kJ |
| \dot{Q} | Taxa de Calor, kJ/s |
| r | Raio, m |
| R | Resistência elétrica, Ω (Ohms) |
| R | Constante para gás, kJ/kg K |
| R | Resistência térmica, $^\circ\text{C/W}$ |
| Ra | Número de Rayleigh |
| Re | Número de Reynolds |
| rpm | Rotações por minuto |
| s | Desvio padrão |
| s | Entropia específica, kJ/kg K |
| t | Tempo, s |
| T | Temperatura, $^\circ\text{C}$, K |
| THC | Total de Hidrocarbonetos |
| u | Incerteza padrão |
| u | Incerteza padrão combinada |

| | |
|-----------|---|
| U | Incerteza expandida |
| U | Energia interna, kJ |
| U | Coeficiente global de transferência de calor, $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ |
| V | Tensão elétrica, V |
| V | Velocidade, m/s |
| \dot{V} | Vazão, m^3/s |
| x | Fração em massa, % |
| W | Trabalho, kJ |
| \dot{W} | Potência, kJ/s |
| y | Fração molar, % |
| Z | Fator de compressibilidade (gás) |

Símbolos em Letras Gregas

| | |
|---------------|--|
| β | Coeficiente de dilatação térmica, K^{-1} |
| ρ | Massa específica, kg/m^3 |
| η | Eficiência, % |
| Δh | Variação de entalpia, kJ/kg |
| ΔT | Variação de temperatura, $^\circ\text{C}$ |
| ε | Efetividade, % |
| δ | Incerteza |
| ϕ | Espessura, m |
| ν | Número de graus de liberdade |
| μ | Viscosidade absoluta, kg/ m.s |
| ν | Volume específico, m^3/kg |
| ν | Coeficiente estequiométrico |
| ν | Viscosidade cinemática, m^2/s |

Subscritos

| | |
|-----|---------|
| 0 | Inicial |
| a | Real |

| | |
|-------------|---------------------------|
| <i>aço</i> | Aço inoxidável – material |
| <i>ag</i> | Água |
| <i>amb</i> | Ambiente |
| <i>ar</i> | Ar |
| <i>c</i> | Combustível |
| <i>câm</i> | Câmara |
| <i>cil</i> | Cilíndrico |
| <i>cobr</i> | Cobre – material |
| <i>comb</i> | Combustão |
| <i>comp</i> | Compressor |
| <i>cons</i> | Consumo |
| <i>disp</i> | Disponível |
| <i>dp</i> | Desvio padrão |
| <i>e</i> | Entrada |
| <i>el</i> | Elétrica |
| <i>ef</i> | Efetivo |
| <i>eq</i> | Equivalente |
| <i>Ex</i> | Exaustão |
| <i>f</i> | Frio |
| <i>f</i> | Água fria |
| <i>f</i> | Película |
| <i>forn</i> | Fornecido |
| <i>g</i> | Gases |
| <i>GN</i> | Gás natural |
| <i>i</i> | Componente i |
| <i>ind</i> | Individual |
| <i>inf</i> | Infinito |
| <i>isol</i> | Isolante térmico |
| <i>lat</i> | Lateral |
| <i>lm</i> | Média logarítmica |
| <i>m</i> | Média |
| <i>m</i> | Medidor |
| <i>max</i> | Máximo |
| <i>med</i> | Medido |
| <i>min</i> | Mínimo |

| | |
|----------|--------------------|
| O_2 | Oxigênio |
| p | Pressão constante |
| pd | Padrão |
| q | Quente |
| q | Água quente |
| rec | Recuperado |
| reg | Regenerador |
| res | Reservatório |
| s | Saída |
| s | Isentrópico |
| $sist$ | Sistema |
| s/cog | Sem cogeração |
| T | Temperatura |
| $term$ | Térmica |
| tot | Total |
| $turb$ | Turbina |
| $util$ | Utilizado |
| v | Volume constante |
| VC | Volume de controle |
| w | Parede |
| ∞ | Infinito |

*Um projeto na mente é água profunda,
mas quem é inteligente tira-o do fundo.
Provérbios 20,5*