

Sumário

PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TERMODINÂMICA	1
1.1 Variáveis e Transformações Termodinâmicas	1
1.2 Primeiro Princípio da Termodinâmica	1
1.3 Segundo Princípio da Termodinâmica	2
1.4 Expressões das Variáveis Termodinâmicas para cada Transformação	2
1.5 Ciclos das Termelétricas Convencionais	6
1.6 Ciclo Teórico do Motor de Combustão por Centelha (Otto)	6
1.7 Ciclo Real do Motor de Combustão por Centelha (Otto)	8
1.8 Diferenças Básicas entre os Ciclos Teórico e Real dos Motores Otto	8
1.9 Conclusões da Comparação entre os Ciclos Teórico e Real dos Motores Otto	8
1.10 Ciclo Teórico do Motor Diesel	9
1.11 Ciclo Real do Motor Diesel	10
1.12 Diferenças Básicas entre os Ciclos Teórico e Real dos Motores Diesel	10
1.13 Conclusões da Comparação entre os Ciclos Teórico e Real dos Motores Diesel	11
1.14 Ciclo Teórico das Turbinas a Gás (<i>Joule – Brayton</i>)	12
1.15 Ciclo Real das Turbinas a Gás (<i>Joule – Brayton</i>)	12
1.16 Diferenças Básicas entre os Ciclos Teórico e Real das Turbinas a Gás	13
1.17 Conclusões da Comparação entre os Ciclos Teórico e Real das Turbinas a Gás	14
1.18 Ciclo Teórico da Turbina a Vapor	14
1.19 Ciclo Real da Turbina a Vapor	15
1.20 Diferenças Básicas entre os Ciclos Teórico e Real da Turbina a Vapor	15
1.21 Conclusões da Comparação entre os Ciclos Teórico e Real das Turbinas a Vapor	16
BALANÇO TERMODINÂMICO DOS CICLOS TÉRMICOS	17
2.1 Rendimento Térmico do Ciclo Rankine	17
2.2 Energia Térmica Trocada no Ciclo Rankine	17
2.3 Fluxo de Água de Circulação do Condensador da TV	17
2.4 Cálculo do Balanço de Energia no Ciclo Rankine	18
2.5 Rendimento do Ciclo Rankine	19

2.6 Desenvolvimento do Cálculo do Ciclo de 300 MW com Extrações e com Reaquecimento	21
2.7 Rendimento Térmico do Ciclo Rankine	23
2.8 Energia Térmica do Condensador Principal no Ciclo Rankine	24
2.9 Fluxo de Vapor no Condensador Principal no Ciclo Rankine	24
2.10 Fluxo de Vapor Superaquecido na Turbina de Alta Pressão	24
2.11 Fluxo de Vapor Reaquecido na Turbina de Média Pressão	24
2.12 Fluxo de Vapor nas Extrações da Turbina para os Aquecedores	24
2.13 Fluxo de Água de Circulação do Condensador Principal	25
2.14 Desenvolvimento do Cálculo do Ciclo Rankine de 20 MW com Extrações e sem Reaquecimento	26
2.15 Rendimento Térmico do Ciclo Rankine de 20 MW	28
2.16 Energia Térmica do Condensador Principal no Ciclo Rankine	28
2.17 Fluxo de Vapor no Condensador Principal	28
2.18 Fluxo de Vapor Superaquecido na Turbina de Alta Pressão	29
2.19 Fluxo de Vapor nas Extrações da Turbina Para os Aquecedores	29
2.20 Fluxo de Água de Circulação do Condensador Principal	29
2.21 Vantagens da Metodologia Apresentada	34
2.22 Programas em Excel para Determinação de Balanços dos Ciclos Térmicos	34
2.23 Rendimento da Turbina a Vapor no Ciclo Combinado	36
2.24 Balanço de Energia no Ciclo Combinado 207 FA	37
2.25 Desenvolvimento do Cálculo	37
2.26 Cálculo dos Rendimentos, Fluxos de Vapor e da Energia Trocada no Ciclo 207 FA	39
2.27 Balanço de Energia no Ciclo Brayton	44
2.28 Rendimento Térmico do Ciclo Brayton	44
2.29 Energia Térmica na Exaustão do Ciclo Brayton	45
2.30 Fluxo de Gases na Exaustão no Ciclo Brayton	45
2.31 Emissões Gasosas nas Usinas Termelétricas	46
2.32 Cálculo das Emissões Gasosas nas Usinas	46
2.33 Balanço de Energia do Ciclo Diesel	48
2.34 Rendimento Térmico do Motor Diesel	49
2.35 Energia Térmica Trocada no Motor Diesel	50
2.36 Fluxo de Gases na Exaustão do Motor Diesel	51
2.37 Ciclos Combinados (Diesel-brayton)	51
2.38 Características Operacionais dos Motores Testados	53
2.39 Determinação Prática do Consumo de Combustível em Tanque Cilíndrico Vertical	53
2.40 Determinação Prática do Consumo de Combustível em Tanque Cilíndrico Horizontal	53
2.41 Determinação da Energia Gerada por Medição	54
2.42 Determinação da Potência Gerada por Medição	54
2.43 Razão Ar/Combustível	54
2.44 Determinação do Excesso de Ar pela Medição Do O	54

2.45 Relação Teórica Ar/Combustível	55
2.46 Relação Atual Ar/Combustível pelo Processo de Medição do Excesso de Ar	56
2.47 Relação Atual Ar/Combustível pelo Cálculo da Energia dos Gases da Exaustão	57
2.48 Excesso de Ar pelo Cálculo da Temperatura do Fluxo dos Gases da Exaustão	57
ANÁLISE DA OPERAÇÃO DAS USINAS TERMELÉTRICAS	59
3.1 Curvas Características de CE e de Rendimento	59
3.2 Condições de Manutenção	59
3.3 Análises dos Problemas Operacionais Relacionados com Furos nas Caldeiras	68
3.4 Limites Térmicos Operacionais das Máquinas Térmicas	69
3.5 Limites Térmicos das Caldeiras de Circulação Natural	69
3.6 Limites Térmicos das Caldeiras de Circulação Forçada ou Assistida	72
3.7 Limites Térmicos das Turbinas a Vapor	72
3.8 Limites Térmicos das Turbinas a Gás	73
3.9 Limites Térmicos dos Motores	73
3.10 Operação Econômica das Unidades	74
COMBUSTÍVEIS DAS TERMELÉTRICAS CONVENCIONAIS	77
4.1 Hidrocarbonetos (Petróleo)	77
4.2 Principais Características dos Óleos Combustíveis	80
4.3 Principais Características dos Óleos para Motores Diesel	82
4.4 Biomassa	83
4.5 Biogás	83
4.6 Gás Natural	86
4.7 Carvão Mineral	87
4.8 Mercado Potencial para a Cinza Seca	88
4.9 Produção de Cinza nas Usinas Termelétricas a Carvão	89
4.10 Área Necessária para Deposição de Cinza	90
MEDIDAS DE CONTROLE AMBIENTAL DAS EMISSÕES DOS GASES DA COMBUSTÃO	93
5.1 Procedimentos Adotados para Reduzir os Efeitos Ambientais	93
5.2 Tecnologias Empregadas para Redução das Emissões nas Usinas Termelétricas	94
5.3 Tecnologias de Redução das Emissões após a Combustão	94
5.4 Processo de Adsorção com Hidróxido de Magnésio	94
5.5 Processo de Adsorção com Carbonato de Cálcio	94
5.6 Processo com Injeção de Amônia e Redução Catalítica Seletiva	95
5.7 Tecnologias de Redução das Emissões Durante a Combustão	97
5.8 Queimadores de Baixo NO ₂ sem Injeção de Vapor	97
5.9 Queimadores de Baixo NO ₂ com Injeção de Vapor	98

5.10 Tecnologias de Redução das Emissões Antes da Combustão	98
5.11 Abatimento do SO ₂ , NO ₂ e NO na Combustão em Leito Fluidizado	98
ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS E DOS SISTEMAS DAS USINAS TERMELÉTRICAS	101
6.1 Especificações dos Equipamentos do Ciclo Rankine	102
6.2 Especificação da Caldeira a Vapor e Auxiliares	103
6.3 Especificação da Turbina a Vapor e Equipamentos do Ciclo Térmico	104
6.4 Especificação do Gerador Elétrico e dos Auxiliares	108
6.5 Diagramas de Fluxo do Ciclo Rankine	108
6.6 Especificações dos Equipamentos do Ciclo Combinado	109
6.7 Turbinas a Gás	109
6.8 Gerador Elétrico do Ciclo Combinado	109
6.9 Caldeiras de Recuperação de Calor	109
6.10 Turbinas a Vapor	110
6.11 Diagramas de Fluxo do Ciclo Combinado	110
CUSTOS DE USINAS TERMELÉTRICAS	111
7.1 Determinação dos Custos Envolvidos nas Usinas Termelétricas	111
7.2 Custos da Energia Gerada	114
TECNOLOGIA DAS TERMELÉTRICAS	119
8.1 Caldeiras a Vapor	119
8.2 Turbinas a Vapor	122
8.3 Turbinas a Gás	124
8.4 Motores Diesel	126
8.5 Características dos Componentes Principais Motor Wartsila	128
8.6 Características Operacionais do Motor Wartsila	128
8.7 Características do Sistema de Combustível	129
8.8 Características do Turbo Compressor	129
8.9 Características do Cabeçote das Válvulas	130
8.10 Características do Pistão	131
8.11 Características da Biela	131
8.12 Características do Eixo de Manivelas	132
8.13 Características dos Mancais	133
8.14 Características do Bloco dos Cilindros	133
BALANCEAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO	135
9.1 Descrição do Método de Balanceamento	135
9.2 Determinação das Massas de Teste	137
9.3 Balanceamento da Turbina a Gás	137
SISTEMAS DE CONTROLE	141
10.1 Esquemático do Sistema Oscilante Mecânico	141
10.2 Significados do Diagrama em Bloco	142

10.3 Definições e Características do Regulador	142
10.4 Exemplos Práticos de Regulação Aplicáveis à Operação de Usinas	142
10.5 Instrumentos de Proteção da Unidade	146
10.6 Turbina a Vapor	146
10.7 Caldeira	147
10.8 Turbinas a Gás	148
10.9 Motor Diesel	149
10.10 Gerador Elétrico	150
ANEXO 1	151
Equivalência de Unidades	151
REFERÊNCIAS	153