

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR



ELETROBRÁS Centrais Elétricas Brasileiras

Praia do Flamengo, 66 – Bloco A – 14º andar - Flamengo

CEP 22210-030 – Rio de Janeiro – RJ

Tel.: (21) 2514-5151 – Fax: (21) 2507-2474

PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Av. Rio Branco, 53 – 20º andar - Centro

CEP 20090-004 – Rio de Janeiro – RJ

Tel.: (21) 2514-5197 – Fax: (21) 2514-5155

FICHA CATALOGRÁFICA

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA

Eficiência Energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

196p. ilust. (Contém CD)

1.Conservação de Energia Elétrica.2.Vapor.3.Geração de Vapor.4.Distribuição de Vapor.5.Utilização de Vapor.I.Título.II.Nogueira, Luiz Augusto Horta.III.Nogueira, Fábio José Horta.IV.Rocha, Carlos Roberto.

CDU: 621.3.004

621.6.02

621.1

621.6.02.004.14

Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a ELETROBRÁS/PROCEL e o consórcio EFFICIENTIA/FUPAI

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - CEP. 70.065-900
– Brasília – DF
www.mme.gov.br

Ministra
Dilma Rousseff

ELETROBRÁS/PROCEL

Av. Rio Branco, 53 - 20º andar - Centro - CEP 20090-004 - Rio de Janeiro – RJ
www.eletronbras.com/procel - procel@eletronbras.com

Presidente
Silas Rondeau Cavalcante Silva

Diretor de Projetos Especiais e Desenvolvimento Tecnológico e Industrial e Secretário Executivo do PROCEL
Aloisio Marcos Vasconcelos Novais

Chefe de Departamento de Planejamento e Estudos de Conservação de Energia e Coordenador Geral do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética
Renato Pereira Mahler

Chefe da Divisão de Suporte Técnico de Conservação de Energia e Coordenador Técnico do Projeto de Disseminação de Informações de Eficiência Energética
Luiz Eduardo Menandro Vasconcellos

Chefe da Divisão de Planejamento e Conservação de Energia
Marcos de Queiroz Lima

Chefe de Departamento de Projetos Especiais
George Alves Soares

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Setoriais de Eficiência Energética
Fernando Pinto Dias Perrone

Chefe da Divisão de Desenvolvimento de Projetos Especiais
Solange Nogueira Puente Santos

EQUIPE TÉCNICA

Coordenador Geral
Marcos Luiz Rodrigues Cordeiro

Apoio Técnico
Humberto Luiz de Oliveira

CONSORCIO EFFICIENTIA/FUPAI

EFFICIENTIA
Av. Afonso Pena, 1964 – 7º andar – Funcionários – CEP 30130-005 – Belo Horizonte – MG
www.efficientia.com.br - efficientia@efficientia.com.br

Diretor Presidente da Efficientia
Elmar de Oliveira Santana

Coordenador Geral do Projeto
Jaime A. Burgoa/Tulio Marcus Machado Alves

Coordenador Operacional do Projeto
Ricardo Cerqueira Moura

Coordenador do Núcleo Gestor dos Guias Técnicos
Marco Aurélio Guimarães Monteiro

Coordenador do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro
Cid dos Santos Scala

FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria
Rua Xavier Lisboa, 27 – Centro – CEP 37501-042 – Itajubá – MG
www.fupai.com.br – fupai@fupai.com.br

Presidente da FUPAI
Djalma Brighenti

Coordenador Operacional do Projeto
Jamil Haddad*
Luiz Augusto Horta Nogueira*

Coordenadora do Núcleo Gestor Administrativo-Financeiro
Heloisa Sonja Nogueira

EQUIPE TÉCNICA

Apoio Técnico
Adriano Jack Machado Miranda
Maria Aparecida Morangon de Figueiredo
Micael Duarte França

Fotografia
Eugênio Paccelli

Autor: Luiz Augusto Horta Nogueira*

Co-autores: Carlos R. Rocha, Fábio José H. Nogueira*

* Professores da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI



SUMÁRIO

Apresentação Considerações iniciais

1	Introdução	13
2	Conceitos e Fundamentos Básicos	18
2.1	Propriedades físicas de uma substância	18
2.2	Temperatura	19
2.3	Pressão	20
2.4	Calor e trabalho	23
2.5	Energia interna e entalpia	25
2.6	Elementos de termodinâmica	26
2.6.1	Conceitos fundamentais	26
2.6.2	Mudança de estado de um sistema termodinâmico	27
2.6.3	Princípio da conservação de massa	27
2.6.4	Princípio da conservação de energia	28
2.7	Ciclos térmicos de Potência	31
2.8	Transferência de calor	32
3	Água e Vapor	35
3.1	A substância pura	35
3.2	Equilíbrio de fases vapor-líquida-sólida da água	36
3.3	Propriedades independentes de uma substância pura	39
3.4	Tabelas de propriedades termodinâmicas	40
4	Combustíveis e Combustão	41
4.1	Definições	41
4.2	Reações de combustão	42
4.3	Excesso de ar	45
4.4	Poder calorífico dos combustíveis	48
4.5	Tecnologia de combustão	49
4.5.1	Fornalhas	49
4.5.2	Queimadores	50
4.6	Tiragem	55
5	Geradores de Vapor	58
5.1	Definições iniciais	58
5.2	Componentes clássicos	59
5.3	Classificação	62
5.4	Caldeiras flamotubulares	62
5.4.1	Caldeira flamotubular compacta	63

5.4.2	Caldeiras verticais	65
5.5	Caldeiras aquotubulares	65
5.5.1	Circulação da água em caldeiras aquotubulares	67
5.6	Comparações entre caldeiras flamotubulares e aquotubulares	68
5.6.1	Grau de combustão e vaporização específica	68
5.6.2	Peso e volume	69
5.6.3	Pressão e grau de superaquecimento do vapor	69
5.6.4	Tempo necessário para atingir a pressão de operação	70
5.6.5	Qualidade da água de alimentação	71
5.6.6	Eficiência térmica	71
5.6.7	Condução e limpeza	71
5.6.8	Vida útil	72
5.7	Caldeiras de condensação	73
5.8	Equipamentos recuperadores de calor	74
5.8.1	Superaquecedores e reauecedores	74
5.8.2	Economizadores	76
5.8.3	Pré-aquecedores	76
6	Alimentação e Tratamento de Água para Caldeiras	77
6.1	Sistemas de abastecimento de água	77
6.1.1	Injetores	78
6.1.2	Bombas centrífugas	79
6.2	Sistemas de tratamentos de água	80
6.2.1	Água de alimentação das caldeiras	80
6.2.2	Análise da água	80
6.2.3	Objetivos gerais do tratamento da água	82
6.2.4	Tratamentos externos	83
6.2.5	Tratamento interno	90
6.2.6	Formação de espuma e arraste	90
7	Medição e Controle	92
7.1	Fundamentos	92
7.1.1	Variáveis de processo	92
7.1.2	Sistema de medição	92
7.1.3	Controle automático	93
7.2	Sistemas de medição	93
7.2.1	Medição de nível	93
7.2.2	Medição de pressão	96
7.2.3	Medição de temperatura	98
7.2.4	Medição de vazão	99
7.3	Sistemas de Controle	100
7.3.1	Controle de nível de água do tubulão	101
7.3.2	Controle da combustão	103

7.3.3	Controle da tiragem	107
7.4	Dispositivos reguladores automáticos	107
7.4.1	Pressostatos	107
7.5	Modernos sistemas de automação e controle de caldeiras	108
7.5.1	Hardware	109
7.5.2	Software	109
8	Distribuição de Vapor	110
8.1	Elementos para dimensionamento de linhas de vapor	110
8.2	Distribuição em um sistema com várias caldeiras	111
8.3	Purgadores e separadores de vapor	113
8.3.1	Definições e utilidade	113
8.3.2	Casos típicos de emprego de purgadores	114
8.3.3	Principais tipos de purgadores de vapor	116
8.3.4	Seleção dos purgadores de vapor	119
8.4	Separadores de umidade para linha de vapor saturado	122
8.5	Isolamento térmico	123
8.5.1	Estruturas dos isolantes	123
8.5.2	Seleção dos materiais para isolamento térmico	125
8.5.3	Espessura para proteção de pessoal	125
8.5.4	Determinação da espessura econômica do isolamento térmico	127
9	Operação de Geradores de Vapor	129
9.1	Identificação de geradores de vapor	129
9.1.1	Placa de identificação da caldeira e registro de segurança	129
9.1.2	Princípios para operação segura de caldeiras	130
9.2	Procedimentos de partida	131
9.3	Procedimentos de parada	135
9.3.1	Parada normal	135
9.3.2	Parada em situação de emergência	136
9.4	Roteiro de vistoria diária	140
10	Eficiência e Medidas de Economia em Sistemas de Vapor	143
10.1	Eficiência térmica de geradores de vapor	143
10.2	Cálculo da eficiência pelo método direto	144
10.3	Cálculo da eficiência pelo método indireto	145
10.3.1	Perdas pela chaminé	146
10.3.2	Perdas por radiação e convecção	147
10.3.3	Perdas por purgas	147
10.3.4	Perdas associadas à temperatura das cinzas	148
10.3.5	Perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas	148
10.3.6	Perdas totais	149

10.4	Medidas de economia em sistemas de vapor	149
10.4.1	Economia na geração de vapor	150
10.4.2	Economia na distribuição de vapor	153
10.4.3	Economia na utilização de vapor	154
11	Sistema de Vapor e Meio Ambiente	156
11.1	O conceito de poluição do ar	156
11.2	Produtos emitidos no processo de combustão	156
11.2.1	Concentração dos produtos emitidos	159
11.2.2	Determinação das concentrações dos gases	159
11.2.3	Determinação das concentrações dos particulados	160
11.3	Processos para redução de poluentes gasosos	164
11.4	Métodos para separação de particulados	166
11.4.1	Separação a seco	166
11.4.2	Separação a úmido	170
11.5	Sistema de tratamento de gases de combustão	172
12	Temas Econômicos	174
12.1	Premissas	174
12.2	Critérios de aprovação de alternativas de investimento	174
12.3	Matemática financeira	175
12.3.1	Juros simples	175
12.3.2	Juros compostos	175
12.3.3	Fluxo de caixa	176
12.3.4	Fator de recuperação de capital	177
12.3.5	Fator de valor presente	177
12.4	Análise de alternativas de investimentos	178
12.4.1	Método do valor presente ou do benefício líquido	178
12.4.2	Método do valor anual líquido	179
12.4.3	Método da taxa interna de retorno	180
12.4.4	Método do tempo de retorno de capital	182
12.5	Análise de alternativas de investimento sob condições específicas	183
12.5.1	Alternativas com vidas diferentes	183
12.5.2	Alternativas com restrições financeiras	183
12.5.3	Exemplo de aplicação	183
13	Bibliografia	186
14	Links Úteis	187
	Anexo	188
	Cogeração	188

APRESENTAÇÃO

Criado em 1985 pelo Governo Federal, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e implementado pela ELETROBRÁS. Seu objetivo principal é contribuir para a redução do consumo e da demanda de energia elétrica no país, por meio do combate ao desperdício desse valioso insumo.

Para tanto, a ELETROBRÁS/PROCEL mantém estreito relacionamento com diversas organizações nacionais e internacionais cujos propósitos estejam alinhados com o citado objetivo. Dentre elas, cabe ressaltar o Banco Mundial (BIRD) e o Global Environment Facility (GEF), os quais têm se constituído em importantes agentes financiadores de projetos na área da eficiência energética.

Neste contexto, o GEF, que concede suporte financeiro para atividades relacionadas com a mitigação de impactos ambientais, como o uso racional e eficiente da energia, doou recursos à ELETROBRÁS/PROCEL, por intermédio do BIRD, para o desenvolvimento de vários projetos. Dentre eles, destaca-se o “Disseminação de Informações em Eficiência Energética”, concebido e coordenado pela ELETROBRÁS/PROCEL e realizado pelo Consórcio Efficientia/Fupai, com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), que objetiva divulgar informações sobre tecnologias de uso eficiente de energia para os profissionais de setores como o industrial, comercial, prédios públicos e saneamento, difundindo aspectos tecnológicos e operacionais que permitam reduzir o desperdício de energia elétrica. Esse projeto também engloba a elaboração de casos de sucesso e treinamentos específicos que retratem os conceitos do uso racional e eficiente da energia.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em 2001, o Brasil vivenciou uma crise de abastecimento no setor elétrico. Entre as consequências positivas desta crise sobressaíram-se duas constatações: a forte participação da sociedade na busca da solução e o papel importante da eficiência no uso de energia. Em decorrência desse processo involuntário de aprendizagem, vem se formando uma consciência de que a eficiência energética não pode estar vinculada apenas a questões conjunturais, mas deve fazer parte, de forma definitiva, da política energética nacional, por meio de ações que visem, por exemplo, agregar valor às ações já em andamento no País, desenvolver produtos e processos mais eficientes e intensificar programas que levem à mudança de hábitos de consumo.

A energia é um insumo fundamental para garantir o desenvolvimento econômico e social de um país. A racionalização do seu uso apresenta-se como alternativa de baixo custo e de curto prazo de implantação, sendo que, em alguns casos, significativas economias podem ser obtidas apenas com mudanças de procedimentos e de hábitos, capazes, também, de impactar positivamente o meio ambiente.

Dentre os aspectos econômicos envolvidos na atividade de racionalização do uso da energia, deve-se destacar a importância de que a mesma se reveste quando analisada sob a ótica estratégica e da imagem da empresa, haja vista que o mercado está cada vez mais orientado a dar preferência a produtos de empresas comprometidas com ações de proteção ao meio ambiente.

Uma empresa que deseja alcançar uma estrutura de custos racionalizada e tornar-se mais competitiva não pode admitir o desperdício ou usar a energia de forma ineficiente e irresponsável. É necessário, pois, um esforço de todos os empregados da empresa, visando obter, como resultado, o mesmo produto ou serviço com menor consumo de energia, eliminando desperdícios e assegurando a redução dos custos.

Espera-se que as informações contidas neste Livro sejam úteis para os técnicos das empresas brasileiras, capacitando-os a implementar melhorias que resultem no uso responsável dos recursos naturais e energéticos e na melhoria da competitividade dos setores produtivos e de serviços do País.

A Eletrobrás / Procel e o Consórcio Efficientia / Fupai agradecem os esforços de todos aqueles que participaram dos vários estágios da elaboração deste documento, incluindo as fases de concepção inicial e de revisão final do texto. Registramos as contribuições, notadamente, de Carlos Henrique Moya, Marcos Luiz Rodrigues Cordeiro e Rose Pires Ribeiro (Consultores).

1 Introdução

1.1 Justificativa e objetivo do Livro

A utilização de calor a temperaturas relativamente baixas em diversos setores industriais é essencial nos principais processos de fabricação, como secagem, desidratação, concentração, cozimento, produção de reações químicas e esterilização microbiológica. Este é o caso de indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, farmacêutica e de quase todas as agroindústrias. De fato, sem o calor, sem o aporte de energia térmica em quantidades generosas e com alta qualidade não existiria a sociedade moderna, com seu padrão de vida e seus altos níveis de consumo de bens e serviços. De um modo quase absoluto, estes fluxos de calor são conseguidos a partir de sistemas de vapor.

O uso de vapor de água como vetor de transporte de energia térmica traz grandes vantagens, que explicam sua grande disseminação, pois a água é uma substância facilmente disponível, pouco agressiva quimicamente e com grande capacidade de transportar energia. Em média, cerca de 15 kg de vapor contêm a energia de 1 kg de óleo combustível ou 3 kg de lenha. Na geração e na utilização do vapor ocorrem mudanças de fase, tanto na vaporização quanto na condensação, que causam grandes variações de volume, resultando em elevado coeficiente de transferência térmica, que, somado à alta densidade energética (calor latente) do vapor, produz elevadas taxas de transferência de calor por unidade de área. Portanto, o vapor conjuga de forma muito interessante baixo preço (dependendo do combustível, de 20 a 80 R\$/t), alta densidade energética (> 2700 kJ/kg) e elevada taxa de transferência de energia (> 10.000 W/m².k).

Nessas condições, podendo optar entre produzir calor a partir da queima de combustíveis junto ao ponto de consumo, com todas as dificuldades associadas de transporte, controle e exatidão dos gases, ou gerar este mesmo calor em local mais afastado e transportá-lo utilizando vapor, uma substância limpa e sem problemas maiores de poluição ambiental, essa última rota mostrou-se a mais favorável e adequada. Sob tais condições, gerando o calor em um local apropriado, produzindo vapor de água, transportando esse vapor a outro ponto, e aí então empregando grande parte do calor transportado, operam milhares de sistemas de vapor no Brasil e no mundo, que respondem pelo consumo da maior parte de combustível demandado pelo setor industrial.

O Balanço Energético Nacional, com dados de 2002, estimou, preliminarmente, que 54% da demanda total de energia na indústria, correspondendo a aproximadamente 20% da demanda total de energia do país, cerca de 35 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, estão associados ao vapor. Em centenas de auditorias energéticas, conduzidas em indústrias e outros consumidores de energia térmica, as possibilidades de melhorar o desempenho da geração, distribuição e utilização de vapor eram constantes, sinalizando, em muitos casos, um significativo potencial para adoção, de medidas mitigadoras de perdas com viabilidade econômica e permanente e amplo benefício.

A definição de eficiência em equipamentos térmicos é muito importante para as empresas avaliarem o desempenho dos equipamentos instalados e, mesmo, para a seleção de novos. Porém, faltam normas nacionais, e na ausência dela todos usam as normas DIN (alemã) ou ASME (americana), que adotam parâmetros diferentes. Um mesmo equipamento poderia alcançar eficiência de 93% pelo sistema DIN e apenas 84% no ASME.

Os geradores de vapor de concepção atualizada possuem elevada eficiência térmica. Por exemplo, a empresa líder de mercado brasileiro de caldeiras lançou uma linha de caldeiras flamotubulares que geram de 2 a 34 t/h de vapor, com pressão de até 21 bar, possuindo design compacto, traseira úmida e reduzido número de tubos, cuja eficiência é de 91% (segundo a norma DIN). Porém, com a instalação de um economizador, a eficiência pode chegar a 95%. O economizador é um trocador de calor que pré-aquece a água, disponível apenas para equipamentos a gás.

A eficiência de uma caldeira está relacionada diretamente com a temperatura de saída dos gases de escape. Quanto menor a temperatura, maior a eficiência. Porém, o alto teor de enxofre, presente nos óleos combustíveis, exige saída de gases com temperatura sempre superior a 180°C, de modo a evitar problemas com corrosão. Na queima de gás natural, a saída dos fumos pode ser ajustada para algo como 220°C, reduzida a menos de 180°C no pré-aquecedor. Nem a redução do teor de enxofre nos óleos combustíveis de 4% para 1%, no máximo, permitiria o uso do economizador, pois a limitação em 1% é significativa do ponto de vista ambiental, mas não elimina o problema da corrosão.

Algumas empresas nacionais se mantêm fieis aos padrões norte-americanos, de taxa de evaporação da ordem de 29 kg/m², produzindo caldeiras de quatro passes de 3 a 35 t/h de vapor, sendo que a temperatura de saída dos gases dessa caldeira de quatro passes é por volta de 180°C, o que não acarreta problemas significativos de corrosão, mesmo com óleos combustíveis. Existem diferenças de conceitos entre os fabricantes dos EUA e os europeus para projeto de caldeiras. Na Europa, a prioridade é concedida para a produ-

ção de equipamentos compactos, capazes de produzir vapor com menor área de troca. Por isso, a opção é por taxas de evaporação acima de 50 kg/m². Já os americanos buscam mais eficiência e durabilidade, aproveitando ao máximo a temperatura dos gases.

Uma boa alternativa para melhorar a eficiência é a modernização das caldeiras a lenha, dotando-as de inversores de frequência nos motores dos ventiladores, com mais precisão nos movimentos e economia de energia elétrica, além de controle de pressão na fornalha, além de prepará-las para que as operações de carga sejam feitas com carrinhos, com rapidez, evitando a perda elevada de calor.

Outra medida consiste em substituir as grandes caldeiras aquotubulares instaladas durante a década de 1970, que já se encontram no final de vida útil. São equipamentos de boa qualidade, muito duráveis, mas que já deveriam estar sendo trocados, pois apresentam razoável nível de perdas e desperdícios de energia, resultando em maior consumo de combustível e menor eficiência com relação às caldeiras mais modernas. Somente com a reforma destes equipamentos não se obtém uma boa melhoria significativa da eficiência. Também é preciso considerar que leva-se pelo menos onze meses para fabricar cada caldeira dessas.

A adoção de programa de medidas gerenciais e operacionais para a melhoria da eficiência na distribuição e na utilização do vapor pode reduzir as perdas e desperdícios de energia, como demonstra a experiência brasileira e a internacional. Deve-se observar que freqüentemente estas medidas podem ser adotadas em curto prazo e sob custos reduzidos, já que pressupõem, fundamentalmente, mudanças de padrões e hábitos de consumo, sem exigir grandes investimentos.

Deste modo, cada vez mais se torna evidente que usar bem energia e reduzir desperdícios, além de ser possível, é uma postura inteligente, racional, com vantagens econômicas, sociais e ambientais em vários níveis. Entretanto, uma das carências mais relevantes para concretizar ações nesta direção tem sido a falta de informações para os usuários e responsáveis pelos sistemas energéticos. Cumpre auxiliar o entendimento do funcionamento desses sistemas a vapor, habilitando sua concepção, operação e manutenção cada vez mais eficientes.

É exatamente esse o objetivo do presente Livro: oferecer um conjunto de informações acessíveis, consistentes e de aplicação imediata para os usuários de sistemas a vapor interessados em ganhar com a redução de suas perdas e com o incremento de sua eficiência.

Apresentação do Livro

Este Livro se compõe de um conjunto de capítulos de informações teóricas e aplicadas, divididos em três partes: I - Fundamentos; II - Equipamentos e Instalações e III; - Eficiência, Meio Ambiente e Economia, alguns anexos informativos e um pacote de aplicativos computacionais para informar como operam os sistemas energéticos a vapor, como ocorrem os processos energéticos envolvidos e como podem ser detectadas e reduzidas as perdas de energia.

Parte I - Fundamentos

O primeiro capítulo trata dos conceitos e fundamentos relacionados à termodinâmica e a fenômenos de transporte, importantes ferramentas para a devida compreensão do que acontece na geração, transporte e utilização de vapor. O segundo capítulo segue nestes passos básicos e apresenta as propriedades físicas da água e do vapor, fundamentais para o cálculo das energias envolvidas nos sistemas a vapor. O terceiro capítulo dedica-se aos fundamentos sobre os combustíveis e processo de combustão, fonte quase que única de energia na produção de vapor.

No quarto capítulo são introduzidas as caldeiras, ou geradores de vapor, em seus componentes, tipos e principais características. De fato, é nas caldeiras que se localizam boa parte das oportunidades de redução dos desperdícios de energia em sistemas de vapor.

Parte II - Equipamentos e Instalações

O quinto capítulo se dedica à apresentação das tecnologias e das implicações associadas ao tratamento de água, pois a qualidade da água usada para produção de vapor é uma das causas de freqüentes perdas de energia, que, quando inadequada, promove a formação de depósitos que reduzem a transferência de calor, além de impor purgas periódicas de água da caldeira, com perdas adicionais de energia.

Os capítulos sexto, sétimo e oitavo exploram, respectivamente, os sistemas de instrumentação e controle, a distribuição de vapor e a operação de geradores de vapor, e temas tecnológicos de grande relevância para o uso eficiente de energia em sistemas a vapor. Significativas economias de energia e de recursos têm sido conseguidas com o monitoramento de linhas de distribuição de vapor, programas de acompanhamento de vazamentos de purgadores e rotinas adequadas de operação, bem assim com a incorporação a estes sistemas da evolução dos sistemas de automação e controle, que, sobretudo

nos casos com demandas variáveis, podem atenuar as quase que inevitáveis perdas associadas aos processos transientes, seja na geração ou na utilização de vapor.

Parte III - Eficiência, Meio Ambiente e Economia

O nono capítulo, utilizando a análise dos processos de combustão para determinar a eficiência mediante métodos diretos e indiretos, trata da análise da eficiência das caldeiras. É o tema em que se busca apresentar métodos de utilização imediata para medir e avaliar a eficiência de caldeiras e, também, de medidas que possibilitem o aumento da economia de combustível com a melhoria da eficiência.

No décimo capítulo, abordam-se os temas ambientais relativos aos sistemas a vapor, em particular relacionados às emissões, quanto a sua importância e maneiras de atenuação. O último capítulo apresenta elementos de análise econômica, úteis para o estudo de viabilidade da redução de perdas em caldeiras e demais componentes de sistemas a vapor.

Anexos

Ao final do Livro, apresentam-se as referências utilizadas e uma relação de links com fabricantes de caldeiras no Brasil. Incluem-se, também, uma breve revisão de sistemas de cogeração e um conjunto de tabelas e gráficos de propriedades termodinâmicas do vapor d'água. Acompanha este Livro um CD-ROM contendo um pacote de aplicativos computacionais relacionados a sistemas à vapor e a Norma NR-13, legislação brasileira referente a sistemas a vapor.

2 Conceitos e Fundamentos Básicos

Conceitos importantes sobre as propriedades físicas de uma substância e noções fundamentais de termodinâmica e transferência de calor, úteis para a compreensão dos fenômenos que acontecem na geração de vapor, são apresentados neste capítulo. Compreender como funcionam os processos físicos que ocorrem nas caldeiras constitui o primeiro passo para uma operação eficiente e segura.

2.1 Propriedades físicas de uma substância

As propriedades físicas - densidade, volume específico, peso específico e densidade relativa - são conceitos úteis para relacionar volumes e massas de substâncias, especialmente água, vapor e gases, no caso de caldeiras.

Densidade (ρ) - Quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.1)$$

Volume específico (v) - Volume ocupado pela unidade de massa. Pode ser dado pelo inverso da massa específica.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (2.2)$$

Peso específico (γ) - Relação entre o peso e o volume de uma substância. Pode ser dado pelo produto da densidade e pela aceleração da gravidade (g).

$$\gamma = \frac{F_p}{V} = \rho \cdot g \quad [(\text{kg/m}^3) \cdot (\text{m/s}^2)] = [\text{kg/s}^2 \cdot \text{m}^2] \quad (2.3)$$

Densidade relativa (d) - Relação entre o peso da substância e o peso de um igual volume de água nas condições normais. Pode também ser expressa como a relação entre a massa específica ou o peso específico desta substância e a massa específica ou peso específico de uma substância de referência em condições padrão, respectivamente.

$$d = \frac{\rho_{\text{subst.}}}{\rho_{\text{a'gua}}} = \frac{\rho_{\text{subst.}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{1000} \quad [-] \quad (2.4)$$

A Tabela 2.1 apresenta a densidade relativa de alguns fluídos comuns.

TABELA 2.1 - DENSIDADE DE ALGUNS FLUIDOS COMUNS

FLUÍDO	DENSIDADE RELATIVA
Álcool	0,790
Petróleo	0,810
Glicerina	1,260
Água	1,000
Água marinha	1,030
Gasolina	0,670

2.2 Temperatura

A noção de temperatura é primitiva e nasce das sensações, de quente e frio, apresentadas pelos corpos em diferentes estados térmicos. Normalmente, se através do contato com nossa pele dois corpos apresentam a mesma sensação térmica, dizemos que suas temperaturas são iguais ou que eles estão em *equilíbrio térmico*. No entanto, afirmar que a temperatura de dois corpos é igual ou diferente baseando-se apenas em nossas sensações é muito subjetivo. Para contornar esse fato, a temperatura de um corpo é determinada em função de algumas propriedades físicas que se alteram com as mudanças de temperatura. Por exemplo, alguns metais variam sua condutividade elétrica com variação da temperatura, outros materiais apresentam coeficientes de dilatação volumétrica bem relacionados com a variação da temperatura. A temperatura de uma substância está intimamente ligada ao estado de vibração de suas moléculas. Estado chamado de agitação térmica e que tem uma relação diretamente proporcional com a temperatura do corpo.

Escalas de temperaturas

A escala termométrica mais utilizada é a escala Celsius, introduzida pelo astrônomo sueco Anders Celsius (1701 - 1744). Nessa escala, atribui-se o valor 0 (zero) à temperatura do gelo em fusão sob pressão normal (ponto de gelo). Para a temperatura de ebulição da água sob pressão normal (ponto de vapor) é dado o número 100 (cem). O intervalo entre essas temperaturas é dividido em 100 partes iguais. Estendendo-se essa escala para pon-

tos abaixo de 0 e acima de 100 as temperaturas fora do intervalo de 0 a 100 podem ser determinadas. Existe outra escala, a Fahrenheit, usada principalmente nos países de língua inglesa. No entanto essas escalas dependem da substância termométrica. O físico inglês Lord Kelvin (1824 - 1907) estabeleceu a escala absoluta com base na teoria dos gases. Na escala absoluta não existem valores negativos. Pode-se mostrar que as escalas de temperatura se relacionam entre si da seguinte maneira:

$$\frac{C}{5} = \frac{K - 273}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{R - 491,67}{9} \quad [^{\circ}\text{C}; \text{K}; ^{\circ}\text{F}; \text{R}] \quad (2.5)$$

A Figura 2.1 representa essas escalas.

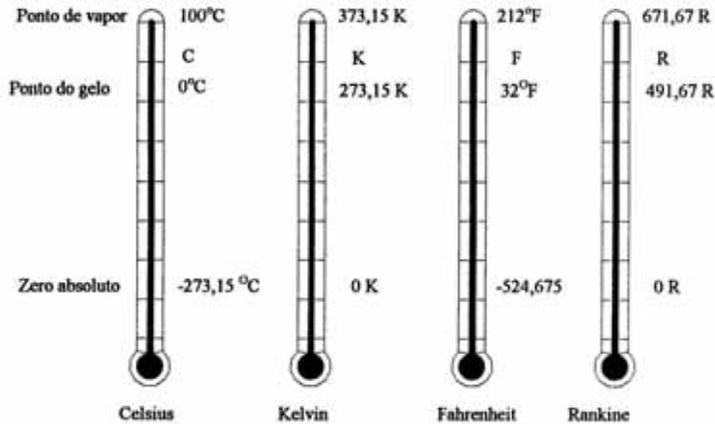


Figura 2.1 - Relação entre as escalas de temperatura

2.3 Pressão

A pressão de um líquido sobre uma superfície é a força normal que este líquido exerce por unidade de área dessa superfície:

$$P = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa}] = [\text{N}/\text{m}^2] = [\text{kg}/\text{s}^2 \cdot \text{m}] \quad (2.6)$$

A pressão é usualmente apresentada de duas formas: absoluta e relativa. Na forma de pressão absoluta (P), é referida a pressão zero absoluto. A denominada pressão relativa, ou manométrica, referida à pressão atmosférica no local da medição (P_{atm}), exercida pela coluna de ar existente na atmosfera, depende basicamente da altitude do local. Ao nível do mar, a pressão atmosférica média é cerca de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$. A pressão manométrica, medida pelos manômetros, pode ser positiva (acima da pressão atmosférica) ou negativa (abaixo da pressão atmosférica).

De acordo com a condição física em que a pressão é determinada, pode-se classificá-la como se segue.

- *Pressão estática* (P_e) - pressão radial exercida pelo fluido, podendo este estar em repouso ou em movimento. Os manômetros geralmente registram a pressão estática.
- *Pressão dinâmica* (P_d) - pressão atribuída à velocidade do fluido em movimento, sendo diretamente proporcional ao quadrado da velocidade:

$$P_d = \rho \frac{V^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (2.7)$$

A Figura 2.2 mostra as relações entre *pressão absoluta* (medida com relação ao vácuo ou zero absoluto) e *pressão manométrica* (medida com relação a pressão atmosférica).

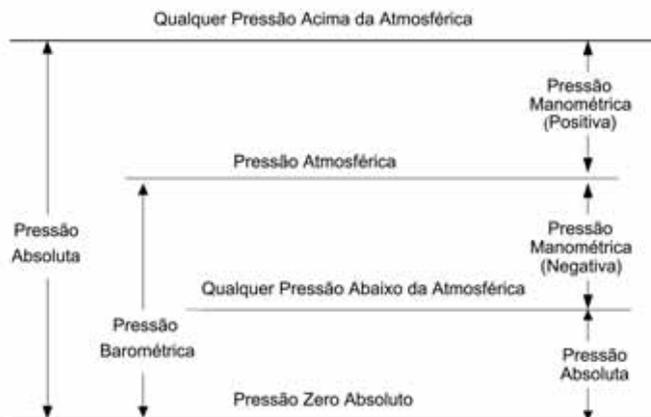


Figura 2.2 - Escalas de referência para medidas de pressão

A Tabela 2.2 contém os fatores de conversão de unidades para pressão úteis nas conversões para vários sistemas de unidade.

TABELA 2.2 - FATORES DE CONVERSÃO DE UNIDADES DE PRESSÃO

FATOR	[kN/m ²] [kPa]	[bar]	[kgf/cm ²]	[atm]	[lbf/pol ²] [psi]	[Torr] [mmHg]	[kgf/m ²] [mmH ₂ O]
1 [kN/m ²] [kPa]	1	0,01	0,0102	9,87 x 10 ⁻³	0,14504	7,501	102
1 [bar]	100	1	1,02	0,987	14,504	750,1	1,021x10 ⁴
1 [kgf/cm ²]	98,0665	0,980665	1	0,9678	14,223	735,56	1,00x10 ⁴
1 [atm]	101,3	1,01325	1,0332	1	14,696	760	1,033x10 ⁴
1 [lbf/pol ²] [psi]	6,8948	0,06895	0,70307	0,068046	1	51,7	704,28
1 [Torr] [mmHg]	0,13332	1,3332x10 ⁻³	1,3595x10 ⁻³	1,3158x10 ⁻³	1,9337 x 10 ⁻²	1	13,62
1 [kgf/ m ²] [mmH ₂ O]	9,79 x10 ⁻³	0,9794x10 ⁻⁴	1,00x10 ⁻⁴	0,965x10 ⁻⁴	1,4199 x 10 ⁻³	0,0734 ⁴	1

Obs: Multiplicar o valor na unidade da linha para obter a unidade da coluna.

A pressão é uma das variáveis de processo mais importantes na geração e na utilização de vapor. Também é usada para classificar as caldeiras do ponto de vista de segurança. A legislação brasileira, a partir da Norma Regulamentadora nº 13 do Ministério do Trabalho, conhecida como NR-13, classifica as caldeiras geradoras de vapor em três categorias:

- caldeiras da categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);
- caldeiras da categoria C são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 (cem) litros; e
- caldeiras da categoria B são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

2.4 Calor e trabalho

O *calor* pode ser definido como a energia térmica que flui devido apenas à diferença de temperatura. O *trabalho* corresponde a qualquer variação de energia mecânica que possa ser associada à elevação de um peso.

Trabalho e calor são formas de fluxos energéticos. São medidos pelas mesmas unidades. A energia é expressa no Sistema Internacional (SI) pelo Joule (J) em que $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$. Particularmente para casos de calor, outra unidade muito usada é a caloria [cal], definida como a quantidade de calor necessária para elevar de 1°C a temperatura de 1 g de água no estado líquido, sob pressão de 1 atmosfera (no intervalo de $14,5^\circ\text{C}$ a $15,5^\circ\text{C}$). No sistema inglês, em progressivo desuso, em decorrência da normalização das unidades propostas pelo SI, a energia é medida pelo BTU ("British Thermal Unit"). Um Btu é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma libra de água de 63°F a 64°F . A Tabela 2.3 mostra a relação entre as unidades de energia mais utilizadas.

TABELA 2.3 - RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE ENERGIA

UNIDADE DE ENERGIA	[Kcal]	[kJ]	[Btu]	[kWh]
[kcal]	1	4,187	3,968	$1,163 \times 10^{-3}$
[kJ]	0,2388	1	0,9478	$2,778 \times 10^{-4}$
[BTU]	0,252	1,055	1	3412,14
[kWh]	860	3600	$2,9307 \times 10^{-4}$	1

Obs.: Multiplicar o valor na unidade da linha para obter a unidade da coluna.

Quando um corpo ganha ou perde calor, em geral, muda o estado de agitação térmica de suas moléculas; conseqüentemente, a temperatura do mesmo varia. A quantidade de calor recebida ou cedida por um corpo quando sofre variação de temperatura durante a troca de calor dá-se o nome de *calor sensível*, a qual, depende de sua massa, da variação de temperatura e da natureza do material que o constitui:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [\text{kJ } ^\circ\text{C}] \quad (2.8)$$

em que:

c - calor específico kJ/kg.K;

Q - calor sensível recebido ou cedido kJ;

m - massa do corpo kg; e

$\Delta T = T_2 - T_1$ - variação de temperatura do corpo [$^{\circ}\text{C}$, K].

O calor específico (c) é uma característica dos materiais. Varia de acordo com as condições do processo de aquecimento. Por exemplo, para uma dada variação de temperatura, aquecer um corpo a pressão constante requer mais calor do que em um processo a volume constante. A Tabela 2.4 apresenta os calores específicos de algumas substâncias sólidas, líquidas e gasosas.

TABELA 2.4 - CALORES ESPECÍFICOS MÉDIOS A PRESSÃO CONSTANTE

FLUÍDO	CALOR ESPECÍFICO MÉDIO (0 A 100 [$^{\circ}\text{C}$])	
	(kcal/kg. $^{\circ}\text{C}$)	(kJ/kg.K)
Água	1,00	4,186
Óleo mineral a 20 $^{\circ}\text{C}$	0,45	1,884
Ar seco	0,240	1,005
Porcelana, 0/1000 $^{\circ}\text{C}$	0,91/0,31	3,81/1,30
Tijolo, tijolo refratário	0,20	0,837
Rocha/Vidro	0,20	0,837

O *calor latente* (L) de mudança de estado de uma substância é a quantidade de calor (Q) que a substância recebe ou cede, por unidade de massa (m), durante a transformação sem variar a temperatura. Verifica-se experimentalmente que a quantidade de calor recebida ou cedida por uma substância pura para que esta mude de estado físico (mantendo constante sua temperatura) é diretamente proporcional à sua massa:

$$\frac{Q}{m} = \text{constante} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.9)$$

A constante de proporcionalidade, denominada *calor latente*, depende da substância e da mudança de estado que esta sofre. A Tabela 2.5 apresenta valores do calor latente de fusão e vaporização de alguns materiais sólidos, além da densidade e calor específico.

TABELA 2.5 - PROPRIEDADES DE ALGUNS MATERIAIS SÓLIDOS

MATERIAIS	DENSIDADE 10 ³ x[kg/m ³]	CALOR ESPECÍFICO MÉDIO (0 a 100°C), [kcal/kg.°C]	PONTO DE FUSÃO [°C]	CALOR DE FUSÃO [kcal/kg]	PONTO DE EBULIÇÃO [°C]	CALOR DE EBULIÇÃO [kcal/kg]
Água	1	1	0	80	100	500-650
Alumínio	2,7	0,22	660	85	2270	2800
Chumbo	11,34	0,031	327	5,7	1730	220
Ferro	7,86	0,111	1530	65	2500	1520
Cobre	8,96	0,092	1083	50	2330	1110

2.5 Energia interna e entalpia

Sabe-se que um corpo ou sistema possui energia em virtude dos movimentos de suas moléculas, além da energia decorrente das forças internas atrativas e repulsivas entre partículas. A energia deste tipo é denominada *energia interna* do corpo ou sistema, designada pela letra U , sendo sua unidade dada em [kJ]. A energia interna por unidade de massa é denominada *energia interna específica*, e designada pelo símbolo u , cuja unidade é [kJ/kg]. Portanto, a energia interna absoluta U é igual ao produto da *energia interna específica* u pela massa do corpo ou sistema, m :

$$U = m \cdot u \text{ [kJ]} \quad (2.10)$$

Nos processos com escoamento de fluídos, como ocorrem em caldeiras e bombas, aparece, com muita frequência, a soma da energia interna U com o produto $P \cdot V$ (conhecido como *energia de expansão*). Por conveniência, define-se uma nova propriedade extensiva chamada *entalpia*:

$$H = U + P \cdot V \text{ [kJ]} \quad (2.11)$$

Ou por unidade de massa (*entalpia específica*):

$$h = u + P \cdot v \text{ [kJ]} \quad (2.12)$$

A entalpia também é uma propriedade termodinâmica de fluídos, pois resulta da combinação de três propriedades U, P e V. Assim, depende apenas do estado do sistema, e não do processo pelo qual o sistema chegou ao estado considerado. A entalpia é uma propriedade muito importante, sendo usada com frequência para determinar balanços de energia, pois a energia que um fluído “transporta” ao entrar ou sair de um sistema é determinado exatamente por sua entalpia, geralmente expressa em [kJ/kg] ou [kcal/kg].

O calor específico pode ser definido como a relação entre a energia transferida durante um determinado processo, por unidade de fluido envolvido, dividida pela correspondente mudança de temperatura que ocorre no fluido durante este processo. Para os processos de maior interesse, a pressão constante e volume constante, definem-se calores específicos particulares. Para qualquer processo a *pressão constante* (com ou sem escoamento) o calor específico é definido como:

$$c_p = \left(\frac{q}{\Delta T} \right)_p = \left(\frac{\Delta h}{\Delta T} \right)_p \quad [\text{kJ/kg.K}] \quad \text{ou} \quad \Delta h = c_p \cdot \Delta T \quad [\text{kJ}] \quad (2.13)$$

Para o processo a volume constante (que só pode ser um processo sem escoamento):

$$c_v = \left(\frac{q}{\Delta T} \right)_v = \left(\frac{\Delta u}{\Delta T} \right)_v \quad [\text{kJ/kg.K}] \quad \text{ou} \quad \Delta u = c_v \cdot \Delta T \quad [\text{kJ}] \quad (2.14)$$

em que os subscritos p e v indicam processos a pressão e a volume constante, respectivamente.

2.6 Elementos de termodinâmica

Apresentadas as definições e propriedades básicas, é interessante rever as leis físicas que governam as transformações energéticas nas caldeiras e nos sistemas de utilização de vapor.

2.6.1 Conceitos fundamentais

Sistema termodinâmico - Consiste em uma quantidade de matéria ou região para a qual nossa atenção está voltada, definido em função do que se pretende analisar. Tudo que se situa fora do sistema termodinâmico é chamado *meio* ou *vizinhança*. O sistema termodinâmico é demarcado por uma *fronteira* ou *superfície de controle*, que pode ser móvel ou fixa, bem como real ou imaginária. Os sistemas termodinâmicos podem ser:

- Sistema fechado - Não há fluxo de massa nas fronteiras que o definem.
- Volume de controle - Há fluxo de massa na superfície de controle que define o sistema.

A água de uma caldeira fechada, em aquecimento, sem entrada de água nem saída de vapor é um sistema termodinâmico fechado, pois não há fluxo de massa nas fronteiras do sistema, embora haja fluxo de calor para a água. Já uma fornalha de caldeira ou uma válvula aberta em que circula vapor corresponde a volumes de controle, porque existe massa (ar, combustível, produtos de combustão, vapor) circulando nas fronteiras do sistema ou sua superfície de controle.

2.6.2 Mudança de estado de um sistema termodinâmico

Quando qualquer propriedade do sistema é alterada - por exemplo, pressão, temperatura, massa e volume -, afirma-se que houve uma mudança de estado no sistema termodinâmico. O caminho definido por uma sucessão de estados pelos quais o sistema passa é chamado *processo*. A seguir apresentam-se os principais tipos de processos de interesse:

- Processo isobárico (pressão constante)
- Processo isotérmico (temperatura constante)
- Processo isocórico (isométrico) (volume constante)
- Processo isoentálpico (entalpia constante)
- Processo adiabático (sem transferência de calor)

Quando um sistema (substância), em um dado estado inicial, passa por certo número de mudança de estados ou processos e finalmente retorna ao estado inicial, ele executa um ciclo termodinâmico. Com esses conceitos, apresentam-se, a seguir, as leis físicas básicas de maior interesse para a compreensão do que ocorre em uma caldeira ou sistema térmico a vapor: os princípios de conservação de massa e energia.

2.6.3 Princípio da conservação de massa

O princípio de conservação de massa para um volume de controle assegura que a diferença entre as massas que entram e saem deste volume devem corresponder exatamente à variação de massa no interior do volume de controle, porque massa não se cria nem se destrói. Naturalmente que quando não há variação na quantidade de massa no

volume de controle as massas que entram deve ser igual às massas que saem deste volume.

A expressão 2.15 é uma *contabilidade* dos fluxos de massa. Indica que a variação de massa dentro do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt é igual à quantidade de massa que entra menos a quantidade de massa que sai do volume de controle.

$$\frac{\Delta m_{VC}}{\Delta t} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (2.15)$$

Nesta expressão, \dot{m}_e e \dot{m}_s , correspondem às vazões mássicas na entrada e saída, respectivamente, e Δm_{VC} corresponde à variação da quantidade de massa no volume de controle.

Para volumes de controle em *regime permanente*, isto é, quando existe escoamento, mas sem qualquer variação no tempo, não ocorrem variações de massa no interior do volume de controle. Portanto, vale a equação 2.16. Nestas condições, a soma das massas que entram é igual à soma das massas que saem.

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (2.16)$$

Esta última expressão é útil, por exemplo, para estimar a vazão de vapor em uma caldeira, baseando-se na medição da vazão de água de alimentação, sempre quando não houver variação em seu nível; isto é, sempre quando a caldeira não estiver variando sua quantidade de massa interna. De fato, sobretudo em instalações de menor capacidade, é usualmente mais simples e direto medir a vazão de água que entra na caldeira com um hidrômetro ou a variação de nível no tanque de água de alimentação do que medir a vazão de vapor.

2.6.4 Princípio da conservação de energia

A primeira lei da termodinâmica, ou princípio da conservação da energia, estabelece que energia não pode ser criada nem destruída, mas simplesmente transformada de uma forma em outra. A primeira lei é usualmente aplicada de duas formas: em *sistemas fechados sem escoamento* e em *sistemas abertos com escoamento em regime permanente*. Como visto no item 1.6.1, a água contida em uma caldeira durante o processo de aquecimento é exemplo do primeiro caso, enquanto uma caldeira em regime normal de funcionamento é um exemplo da segunda situação, quando não existem variações de propriedades com o tempo.

Para um volume de controle em regime permanente, caso de maior interesse, as condições da massa dentro do volume de controle não variam com o tempo. A vazão em massa e a taxa de transferência de energia na forma de calor e de trabalho (*potência*) também são constantes com o tempo. Como não há acumulação de massa dentro do volume de controle, o princípio da conservação de energia pode ser representado pela expressão 1.17, que é a equação geral da primeira lei da termodinâmica para regime permanente.

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right) = \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right) \quad (2.17)$$

(taxa de energia de entrada) = (taxa de energia de saída)

em que:

\dot{Q}_{vc} , \dot{W}_{vc} - Taxa de calor e trabalho através do volume de controle, [kW];

\dot{m}_e , \dot{m}_s - Vazão em massa de entrada e saída do Volume de Controle, respectivamente, [kg/s];

h - Entalpia específica, [kJ/kg];

v - Velocidade do fluxo, [m/s];

g - Aceleração da gravidade local $\cong 9,8 \text{ m/s}^2$; e

Z - Altura a partir de um ponto de referência, [m].

Muitas aplicações importantes envolvem apenas uma entrada e uma saída em regime permanente do volume de controle. Assim, o balanço de energia neste caso especial se reduz à equação a seguir.

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \left[(h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + g \cdot (Z_1 - Z_2) \right] = 0 \quad (2.18)$$

Com base nesta última equação, pode-se analisar o processo de geração de vapor em uma caldeira funcionando normalmente, após a fase de aquecimento, como esquematizado na Figura 2.3.

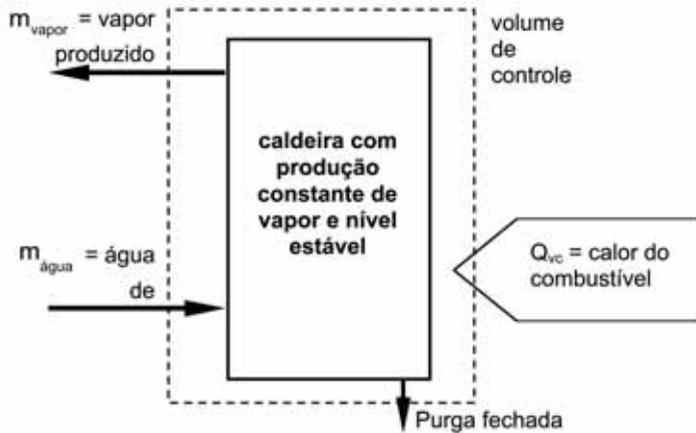


Figura 2.3 - Esquema de uma caldeira

Balanço de massa (expressão 2.16):

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \Rightarrow \dot{m}_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{vapor}} = \dot{m}$$

Balanço de energia (expressão 2.18):

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \left[(h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2} + g \cdot (Z_1 - Z_2) \right] = 0$$

Para uma caldeira, pode-se considerar desprezível a diferença de energia cinética e potencial. Também, não há geração nem consumo de trabalho. Assim:

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m} \cdot [(h_2 - h_1)]$$

Ou seja, o calor fornecido corresponde ao ganho de entalpia da água. Da mesma forma, em um trocador de calor aquecido por vapor o calor cedido por [kg] de vapor é igual à variação de entalpia do vapor entre a entrada e a saída já que não existe trabalho envolvido e os efeitos de energia cinética e potencial podem ser desprezados. A expressão anterior é do maior interesse na determinação da eficiência de caldeiras e será utilizada adiante com este fim.

2.7 Ciclos térmicos de potência

Os ciclos térmicos de potência são uma seqüência de processos termodinâmicos (mudanças de estados). Em particular, os ciclos de potência são utilizados para converter energia térmica em trabalho, empregando usualmente como fluidos gases e água, sendo que no último caso os ciclos são denominados *ciclos a vapor*, ou *ciclo Rankine*. Este tipo de sistema de potência permite converter a energia de combustíveis de baixo custo em eletricidade. Grande parte da energia elétrica produzida em todo mundo utiliza essa tecnologia. Embora analisar estes ciclos esteja fora dos objetivos deste trabalho, considera-se importante apresentar alguns conceitos a respeito, inclusive porque essa tecnologia tende a se expandir nos próximos anos no Brasil.

Os principais equipamentos que compõem os ciclos Rankine são: caldeira de vapor, turbina a vapor, condensador, aquecedores de água de alimentação e bombas necessárias para a circulação da água. De forma geral, o rendimento desses ciclos, ou seja, a parcela do calor que é convertida em eletricidade, depende diretamente da condição do vapor produzido na caldeira e entregue à turbina: quanto mais elevadas sua pressão e temperatura, mais eficiente é o ciclo. Nas configurações de melhor desempenho, trabalha-se com pressão acima de 180 atm e temperatura de 550°C.

Os sistemas de cogeração, uma interessante variante dos ciclos Rankine, emprega o calor residual presente nos gases de escape de turbinas a gás como fonte de calor para a geração de vapor. Neste caso, nos denominados ciclos combinados a caldeira de recuperação aproveita este calor que seria perdido e permite obter eficiências bastante elevadas para ciclos térmicos, ao redor de 50%. Para melhor aproveitar a energia dos gases, pode-se utilizar mais que um nível de pressão na caldeira de recuperação.

Ainda relacionados aos ciclos de potência, há os ciclos de cogeração a vapor, em que a produção de potência se dá simultaneamente à utilização do calor rejeitado pelo ciclo, na forma de vapor de baixa pressão rejeitado pela turbina a vapor e que pode atender com bons resultados às necessidades de calor típicas de uma ampla gama de indústrias, como de alimentos e bebidas, têxtil e química. Nos sistemas de cogeração a vapor, a eficiência global, que relaciona o calor utilizado com o calor entregue aos ciclos, pode ser superior a 80%. Nos anexos deste Livro, agregam-se mais informações sobre sistemas de cogeração.

2.8 Transferência de calor

É da maior relevância para os profissionais interessados em sistema a vapor o conhecimento dos mecanismos de transferência de calor. De fato, seja nas situações em que se desejam altas taxas térmicas ou naquelas em que se pretende reduzir ao máximo os fluxos de calor, é naturalmente necessário entender como a energia flui apenas por uma diferença de temperatura. Como o tratamento desenvolvido neste Livro é naturalmente introdutório, mais detalhes podem ser obtidos em obras de referência de transferência de calor.

Os modos básicos de transferência de calor são três: condução, convecção e radiação. Nos sistemas reais, estes modos ocorrem de forma combinada e acoplada. Um problema típico ocorre quando se deseja determinar exatamente a taxa de transferência de calor, para uma determinada configuração do sistema, com um campo de temperatura conhecido e envolvendo materiais com propriedades também conhecidas.

A condução é o modo de transferência de calor em que a troca de energia acontece em um meio sólido ou um fluido em repouso, pela troca de energia cinética ao nível dos elétrons e moléculas. Uma expressão básica para a taxa de condução de calor em uma superfície plana (q_{cond}), em $[\text{W}/\text{m}^2]$, é dada a seguir, em que (k) corresponde à condutividade térmica; (A), à área de troca térmica; e (x), à distância entre as superfícies quente e fria, respectivamente a (T_1) e (T_2).

$$q_{\text{cond}} = \frac{Q}{A} = k \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{x} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.19)$$

A condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais. Varia bastante: é naturalmente reduzida para os isolantes (ao redor de $0,1 \text{ W}/\text{m.K}$ para o amianto e $1,0 \text{ W}/\text{m.K}$ para os tijolos refratários) e apresenta valores elevados para os metais bons condutores de calor (entre 100 e $500 \text{ W}/\text{m.K}$ para cobre, alumínio, metais nobres). É exatamente por causa da alta resistência à troca de calor por condução, empregando-se calhas de materiais isolantes, que se consegue reduzir as perdas de calor em uma tubulação de vapor.

A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre quando um fluido escoar sobre uma superfície, com ambas as temperaturas diferentes. Evidentemente que a geometria e a velocidade do fluido são variáveis importantes, pois no regime turbulento a troca de calor é muito mais efetiva que sob regime laminar. Também é possível identificar sistemas convectivos, em que a velocidade do fluido é determinada por causas exter-

nas (um ventilador ou uma bomba), na denominada *convecção forçada*, ou por diferenças de densidade provocadas pela transferência de calor, no caso da denominada *convecção natural*.

A expressão a seguir mostra como se relacionam as variáveis: temperatura do fluido (T_f), temperatura da superfície (T_s) e o *coeficiente de transferência de calor* (h) para determinar a taxa de troca térmica por convecção, q_{conv} . Para geometrias complexas, como nas caldeiras e nos trocadores de calor, esta expressão deve ser adaptada para tomar em conta as diversas situações envolvidas.

$$q_{conv} = h (T_f - T_s) \quad [W/m^2] \quad (2.20)$$

O coeficiente h pode ser determinado analiticamente ou experimentalmente. Quase sempre é apresentado em correlações em função da geometria, do tipo de regime de escoamento e dos fluidos envolvidos. A Tabela 2.6 apresenta alguns exemplos como referência, evidenciando a grande variação observada, em especial quando ocorrem mudanças de fase.

TABELA 2.6 - VALORES TÍPICOS PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONVECTIVO

TIPO DE FLUXO	H [W/m ² .k]
Convecção natural (escoamentos externos)	
Ar, $\Delta T = 25^\circ C$, placa vertical de 0,25 m	5
Água, $\Delta T = 25^\circ C$, placa vertical de 0,25 m	440
Ar, $\Delta T = 25^\circ C$, cilindro horizontal f 0,02 m	8
Água, $\Delta T = 25^\circ C$, cilindro horizontal f 0,02 m	741
CONVECÇÃO FORÇADA (ESCOAMENTOS EXTERNOS E INTERNOS)	
Ar a $25^\circ C$, c/ veloc. 10 m/s, sobre placa lisa de 0,1 m	39
Ar a $25^\circ C$, c/ veloc. 10 m/s, sobre placa lisa de 0,5 m	17
Ar, 5 m/s, externo a um duto de f 0,01 m	85
Óleo, 5 m/s, externo a um duto de f 0,01 m	1.800
Água, 1 kg/s, dentro de um duto de f 0,025 m	10.500
Água fervendo em uma panela	3.000
Água fervendo (fluxo máximo de calor)	35.000
Água condensando em superfícies verticais	até 11.000

A radiação térmica é o modo de transferência de calor determinado apenas pelo nível de temperatura do corpo e condições de sua superfície, realizado por meio de ondas eletromagnéticas, podendo ser sintetizado pela expressão a seguir, em que o calor trocado (q_{rad}) é dado em função de um fator F_1 , que leva em conta a forma do corpo e as características radiativas (emissividade) de sua superfície, de sua área A_1 , de uma constante física (σ , Constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,6697 \times 10^{-8}$), das temperaturas do corpo (T_1) e do ambiente em torno desse corpo (T_2).

$$q_{\text{rad}} = F_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.21)$$

Como este tipo de troca térmica depende de uma constante física de reduzido valor, apenas quando alguma das temperaturas envolvidas é elevada, geralmente acima de 1.000°C , é que a radiação passa a ser importante, como no caso das fornalhas das caldeiras.

3 Água e Vapor

As caldeiras, condensadores, evaporadores e vários outros equipamentos operam com fluidos em constante mudança de estado. Podem ocorrer processos de aquecimento, vaporização, condensação, etc. Por esse motivo, a perfeita compreensão desses fenômenos é importante para o estudo desses equipamentos. Este capítulo trata deste assunto, abordando principalmente a água como fluido utilizado. Para facilitar o entendimento, são dadas as seguintes definições:

- *Fase de uma substância*: quantidade de matéria totalmente homogênea, que pode assumir a fase sólida, líquida ou gasosa.
- *Estado de uma substância*: identificado por certas *propriedades*, como pressão, temperatura, volume específico e densidade.
- *Propriedade*: quantidade que depende do *estado do sistema* e independe do caminho pelo qual o sistema chegou ao estado considerado, como pressão, temperatura, volume específico, entalpia, densidade e energia interna.
- *Propriedade intensiva*: independe da massa, como: pressão, temperatura, densidade, entalpia específica e energia interna específica.
- *Propriedade extensiva*: depende da massa, como: volume e massa total do sistema, energia interna e entalpia.

3.1 A substância pura

A substância pura tem composição química invariável e homogênea. Pode existir em mais de uma fase, no entanto a composição química é a mesma em todas as fases. Por exemplo, água líquida e vapor d'água ou uma mistura de água mais gelo são todas substâncias puras, pois cada fase tem a mesma composição. Algumas vezes, uma mistura de gases, como o ar, pode ser considerada como uma substância pura, desde que não haja mudança de fase.

As substâncias puras mais importantes para o estudo da termodinâmica são as chamadas *substâncias simples compressíveis*, para as quais os efeitos de superfície, magnéticos e elétricos não são significativos.

3.2 Equilíbrio de fases vapor-líquida-sólida da água

Suponha-se um sistema formado por um cilindro, um êmbolo e uma certa massa de água no estado líquido. A pressão é mantida constante, por meio de pesos, em $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ e a temperatura inicial é de 25°C , for transferindo calor para esse sistema, a temperatura da água aumenta sensivelmente e o volume específico varia muito pouco. No instante que a temperatura atingir 100°C inicia-se a mudança de fase. Durante essa mudança, a temperatura e a pressão permanecem constantes. No momento que a última porção de líquido houver se vaporizado, a temperatura volta a se elevar.

A temperatura na qual se dá a vaporização, para uma determinada pressão, é chamada de *temperatura de saturação*. Do mesmo modo, a pressão relacionada com uma certa temperatura de saturação é denominada de *pressão de saturação*. Para as substâncias puras existe uma relação muito bem definida entre a pressão e a temperatura de saturação. Por exemplo, para a água a temperatura de saturação na pressão de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ é de $100,0^\circ\text{C}$ e a pressão de saturação para a temperatura de $100,0^\circ\text{C}$ é igual a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$. Essa relação assume a forma típica mostrada no Gráfico 3.1.

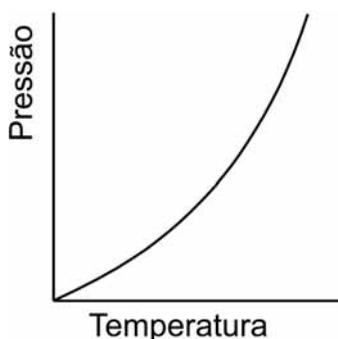


Gráfico 3.1 - Curva de pressão de vapor para uma substância pura

Quando a substância existe na fase líquida à temperatura e pressão de saturação, ela é chamada *líquido saturado*. Caso a temperatura seja mais baixa que a temperatura correspondente à saturação, a substância é denominada *líquido comprimido*.

Se uma substância existir na fase líquida e vapor, na temperatura e pressão de saturação, pode-se definir o *título*, uma propriedade intensiva dada pela relação entre a massa de vapor e a massa total. O título é normalmente simbolizado pela letra x e só tem sentido quando a substância está na condição de saturação.

Uma substância é denominada de *vapor saturado* seco se está presente somente como vapor na condição de saturação e o seu título é de 100%. Caso esse vapor esteja em uma temperatura acima da saturação, recebe o nome de *vapor superaquecido*. Para os vapores superaquecidos não há uma relação entre a pressão e a temperatura, e as duas variáveis são independentes entre si.

Considerando-se novamente o sistema com o cilindro, o êmbolo e a água, pode-se fazer o experimento anterior para várias pressões diferentes, alterando os valores dos pesos sobre o êmbolo. O aspecto típico dos resultados obtidos em um diagrama de Pressão x Volume é mostrado no Gráfico 3.2.

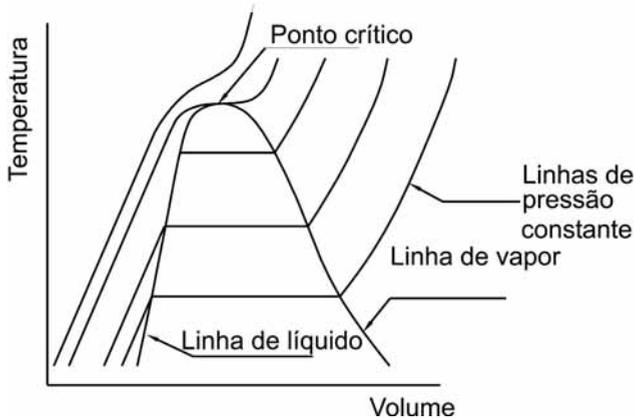


Gráfico 3.2 - Diagrama P x V sem escala para uma substância pura

Neste gráfico, pode-se observar que entre as linhas de líquido e de vapor as curvas correspondentes à pressão constante são horizontais; isto é, dentro dessa região as temperaturas e as pressões são invariáveis. Observa-se também que à esquerda da linha de líquido não existe vapor e que à direita da linha de vapor não pode haver a presença de líquido.

Um ponto notável do diagrama anterior é aquele em que a linha de líquido se encontra com a linha de vapor. Esse ponto é denominado de *ponto crítico*. Nele os estados de líquido e de vapor são idênticos. A esse ponto correspondem a *temperatura, pressão e volume crítico*. Em temperaturas acima da temperatura crítica não existem duas fases presentes, e a substância recebe o nome de fluido. Os valores para o ponto crítico da água são:

Temperatura crítica	374,14	[°C]
Pressão crítica	220,92	[bar]
Volume crítico	0,003155	[m ³ /kg]

Se a experiência anterior for feita com gelo, o resultado será semelhante. No entanto, estariam em jogo três fases: a sólida, a líquida e a de vapor. O aspecto de um diagrama P x T seria o mostrado no Gráfico 3.3.

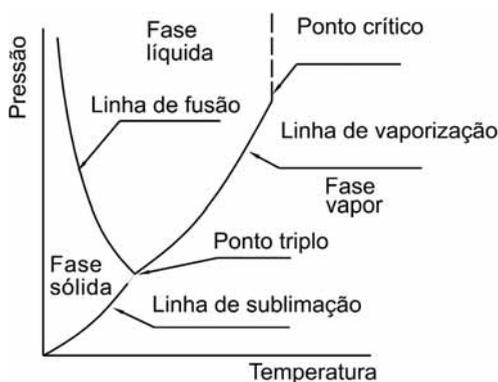


Gráfico 3.3 - Diagrama P x T para a uma substância semelhante à água

Neste diagrama é possível verificar que ao longo da linha de sublimação as fases sólida e vapor estão em equilíbrio; que ao longo da linha de fusão estão em equilíbrio as fases sólida e líquida; que na linha de vaporização estão presentes as fases líquida e vapor. Existe apenas um único ponto em que as três fases coexistem em equilíbrio: é o *ponto triplo*. A linha de vaporização termina no ponto crítico, porque não há mudança distinta da fase líquida para a de vapor acima desse ponto. A pressão e temperatura do ponto triplo, para algumas substâncias, são dadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - DADOS DE ALGUNS PONTOS TRIPLOS, SÓLIDO-LÍQUIDO-VAPOR

SUBSTÂNCIA	TEMPERATURA (°C)	PRESSÃO (bar)
Hidrogênio	-259	0,0719
Nitrogênio	-210	0,1253
Oxigênio	219	0,0015
Mercúrio	-3,9	$0,13 \times 10^{-9}$
Água	0,01	0,0061
Zinco	419	0,0507
Prata	960	$0,10 \times 10^{-3}$
Cobre	1083	$0,79 \times 10^{-6}$

3.3 Propriedades independentes de uma substância pura

Um motivo importante para a introdução do conceito de substância pura é que o estado de uma substância pura simples compressível é definido por duas propriedades independentes. Isso significa que, por exemplo, se o volume específico e a temperatura do vapor superaquecido forem especificados, o estado do vapor estará determinado.

Para entender o significado da expressão *propriedade independente*, considere os estados de líquido saturado e de vapor saturado de uma substância pura. Ambos têm a mesma pressão e temperatura, mas são definitivamente diferentes. Assim, no estado de saturação, pressão e temperatura não são propriedades independentes.

Duas propriedades independentes, tais como pressão e volume específico, ou pressão e título, são requeridas para especificar um estado de saturação de uma substância pura.

Diversas observações experimentais mostram que um gás a baixa pressão e em temperatura mais altas obedece ao seguinte comportamento:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.1)$$

Esse comportamento pode ser generalizado para qualquer gás usando o conceito de volume molar e uma constante denominada constante universal dos gases.

$$P\bar{v} = \bar{R}T, \quad (3.2)$$

em que:

$$\begin{array}{ll} \bar{v} - \text{volume molar} & [\text{m}^3/\text{kmol}] \\ \bar{R} - \text{constante Universal dos gases} & [\text{kJ}/\text{kmol.K}] \end{array}$$

O volume molar é dado pela relação entre o volume específico do gás e o seu peso molecular. O valor da constante universal dos gases, determinado experimentalmente, é 3,31434 k/kmol.K.

Essa expressão é denominada *equação dos gases perfeitos*. É precisa enquanto se está suficientemente distante do ponto crítico da substância. Nas proximidades desse ponto o comportamento dos gases reais se desvia muito daquele que foi assumido para os gases perfeitos.

Nessas situações, a proximidade entre as moléculas e os efeitos de dissociações são considerados em equações bem mais complexas, que podem representar com grande precisão o estado dos gases reais. São expressões que usam desenvolvimentos em séries de Taylor e contam com até mais de trinta constantes. Um exemplo é a equação (3.3), que dá o comportamento do ar:

$$P = \rho RT + \rho^2 \sum A_i T^{2-i} + L + \rho^{13} e^{-\gamma\rho^2} \sum_{i=30}^{32} A_i / T^{(i-32)} \quad (3.3)$$

As constantes usadas nessas equações são determinadas a partir de resultados de ensaios em laboratório.

3.4 Tabelas de propriedades termodinâmicas

O trabalho com essas equações mais complexas geralmente exige o uso de computadores e justifica-se somente para trabalhos mais acurados. Para as aplicações mais comuns, podem ser usadas as tabelas de propriedades termodinâmicas. Muitas substâncias foram estudadas e tabeladas. Em geral, todas elas são apresentadas da mesma forma: são divididas em três seções: líquido comprimido, região de saturação e região de superaquecimento.

Como o vapor d'água é largamente usado nas centrais termelétricas e em vários processos industriais, apresentam-se em anexo algumas tabelas para esta substância.

4 Combustíveis e Combustão

A forma mais empregada para assegurar o fornecimento do calor necessário à produção de vapor é por meio da queima de algum combustível, como gás combustível ou lenha. Interessa, portanto, apresentar os combustíveis e seu processo de fornecimento de calor, do ponto de vista das reações envolvidas e da geração de energia térmica, que se associam diretamente ao impacto ambiental e à eficiência energética na produção de vapor. Neste tópico serão apresentados também elementos das tecnologias de combustão empregadas em caldeiras.

4.1 Definições

A combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica rápida entre duas substâncias, um combustível e um comburente. As reações exotérmicas são aquelas que liberam energia térmica. O combustível é a substância que queima, que se oxida, contendo em sua composição, principalmente, carbono e hidrogênio, e, eventualmente e em menores teores, outros elementos reagentes, como oxigênio e enxofre, ou ainda outros elementos ou compostos que não participam da reação de combustão, como a água. Comburente é o componente da reação de combustão que fornece o oxigênio. Em geral, é usado o ar atmosférico, que apresenta a grande vantagem de não ter custo de fornecimento. Entretanto, o ar contém relativamente pouco oxigênio, existindo 3,76 volumes de nitrogênio por volume de oxigênio (21% em percentagem volumétrica ou 23% em percentagem por peso atômico), além de trazer sempre alguma umidade.

Os produtos da combustão são tipicamente gasosos. Contudo, os elementos do combustível que não se oxidam ou já estão oxidados vão constituir as cinzas. Os combustíveis podem ser classificados de acordo com seu estado físico nas condições ambientes em:

- sólidos: madeira, bagaço de cana, turfa, carvão mineral, carvão vegetal, coque de carvão, coque de petróleo, etc.
- líquidos: líquidos derivados de petróleo, óleo de xisto, alcatrão, licor negro (lixívia celulósica), álcool, óleos vegetais, etc.; ou
- gasosos: metano, hidrogênio, gases siderúrgicos (gás de coqueria, gás de alto forno, gás de aciaria), gás de madeira, biogás, etc.

Alguns combustíveis podem situar-se em uma ou outra classificação, dependendo da pressão. Por exemplo, o gás liquefeito de petróleo, ou GLP, uma mistura de butano e propano, sob pressões relativamente baixas, pode estar no estado líquido.

4.2 Reações de combustão

O conhecimento básico das reações de combustão permite estimar o requerimento de ar teórico e as condições reais de sistemas utilizando combustíveis. Na Tabela 4.1 estão resumidas as reações elementares para o estudo da combustão, correspondentes respectivamente, à oxidação completa e incompleta do carbono, à oxidação do hidrogênio e à oxidação do enxofre. É apresentado também o calor liberado em cada reação, por unidade de massa do combustível.

TABELA 4.1 - REAÇÕES BÁSICAS DE COMBUSTÃO

REAGENTES		PRODUTOS	ENERGIA LIBERADA
$C + O_2$	\longrightarrow	CO_2	+ 8.100 kcal/kg C
$C + 1/2 O_2$	\longrightarrow	CO	+ 2.400 kcal/kg C
$2 H_2 + O_2$	\longrightarrow	$2 H_2O (L)$	+ 34.100 kcal/kg H_2
$S + O_2$	\longrightarrow	SO_2	+ 2.200 kcal/kg S

Deve ser observado que para cada caso existe uma quantidade determinada de oxigênio; portanto, de ar a ser fornecido. A combustão completa quando todos os elementos combustíveis contidos no combustível (C, H, S, etc.) combinam com o oxigênio do ar, fornecendo os produtos finais correspondentes estáveis quimicamente. Neste sentido, a segunda reação apresentada para o carbono, com a formação do monóxido de carbono (CO), não é completa. Fica ainda evidente que a queima parcial do carbono libera bem menos energia que sua total oxidação. Na queima do hidrogênio, a água formada pode estar como líquido ou como vapor, sendo apresentada nessa tabela a energia liberada quando está na forma líquida.

A proporção exata de ar e combustível para uma combustão completa é conhecida como relação *ar/combustível estequiométrica*, uma propriedade característica de cada combustível. Por exemplo, a maioria dos derivados de petróleo requer da ordem de 14 kg de ar por kg de combustível, enquanto a lenha seca requer cerca de 6 kg de ar por kg. Dependendo da temperatura e da pressão, esta quantidade de ar corresponderá a um determinado volume.

Em termos volumétricos, de interesse para combustíveis gasosos, a relação ar/combustível, em m^3 de ar/ m^3 de gás combustível) pode ser estimada pela equação seguinte:

$$(a/c)_{\text{base seca, volume}} = 4,76 (x + y/4 - z/2 + k), \quad (4.1)$$

em que:

a/c - relação ar/combustível estequiométrica;

x - teor molar de carbono;

y - teor molar de hidrogênio;

z - teor molar de oxigênio; e

k - teor molar de enxofre.

Para combustíveis sólidos e líquidos, a quantidade teórica de ar necessária à combustão de um combustível é usualmente apresentada em base mássica (kg de ar/ kg de combustível), podendo ser calculada pela fórmula a seguir, valendo a mesma simbologia da expressão anterior.

$$(a/c)_{\text{base seca, massa}} = \left(\frac{137,28 (x + y/4 - z/2 + k)}{12 x + y + 16 z + 32 k} \right) \quad (4.2)$$

Sendo conhecida a composição em massa do combustível, os teores molares (x, y, z e k) podem ser determinados dividindo-se, respectivamente, os teores mássicos ou em peso por 12, 1, 16 e 32, ou seja, pelos pesos molares destes elementos. Quando existirem inertes, como cinzas ou nitrogênio, a quantidade de ar requerida, determinada pelas expressões anteriores, deverá ser ajustada proporcionalmente.

As Tabelas 4.2 e 4.3 fornecem os coeficientes molares indicativos para serem utilizados nessas expressões e a relação ar/combustível estequiométrica, para os combustíveis usualmente empregados na produção de vapor. Como os combustíveis são quase sempre produtos naturais, os valores apresentados são indicativos.

TABELA 4.2 - COEFICIENTES MOLARES PARA ALGUNS COMBUSTÍVEIS

COMBUSTÍVEL	COEFICIENTE MOLAR				OBSERVAÇÃO
	x	y	z	k	
Óleo combustível	7,2	12	0	0,06	tipo B1, 2% de enxofre
Gás natural (típico)	1,15	4	0,2	0	85% CH ₄ , 10% C ₂ H ₆ e 10% CO ₂
GLP	3,5	9	0	0	50% C ₃ H ₈ e 50% C ₄ H ₁₀
Lenha	4,76	7,2	3,3	0	eucalipto com 30% de umidade
Bagaço de cana	4,02	6,7	2,8	0	
Carvão vegetal	6,19	3,6	0	0	carvão de eucalipto, de boa qualidade
Carvão mineral	7,37	5,7	0	5,7	carvão vapor de Tubarão, SC, 44% cinzas

TABELA 4.3 - RELAÇÕES AR/COMBUSTÍVEL ESTEQUIOMÉTRICAS EM BASE ÚMIDA

COMBUSTÍVEL	RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL ESTEQUIOMÉTRICA	UMIDADE TÍPICA
Óleo combustível	13,5:1 kg/kg	~ 0%
Gás natural (típico)	9,76 m ³ / m ³	0%
GLP	15,1:1 kg/kg ; 26,2 m ³ / m ³	0%
Lenha	3,99 kg/kg	30%
Bagaço de cana	2,95 kg/kg	50%
Carvão vegetal	12,5 kg/kg	~ 0%
Carvão mineral, 44% cinzas	6,89 kg/kg	~ 0%

É interessante notar que a umidade e o teor de cinzas afetam diretamente a relação ar/combustível estequiométrica, já que a parcela do combustível que efetivamente reage é menor quando uma parte de seu peso corresponde à água ou a outros materiais que não vão reagir com o oxigênio. Como um exemplo, um kg de bagaço de cana com 50% de umidade consome apenas a metade do ar requerido pela mesma massa de bagaço seco. A expressão a seguir pode ser utilizada para avaliar a relação ar/combustível em base úmida.

$$(a/c)_{\text{base úmida}} = (a/c)_{\text{base seca}} (1 - \phi/100) \quad (4.3)$$

em que:

ϕ = umidade referida à massa seca do combustível (%)

No presente Livro, as expressões anteriores para cálculo da relação ar/combustível em base seca, em função da composição do combustível, são apresentadas em uma planilha Excel (Cálculos de Combustão.xls), entregue no disquete anexo.

4.3 Excesso de ar

Como a reação de combustão deve ocorrer de forma rápida e em um volume limitado, para assegurar que todo o combustível se oxide, é necessário colocar sempre algum ar em excesso, senão aparecerá combustível sem queimar, com evidentes implicações econômicas e ambientais. De outro lado, o excesso de ar para combustão deve ser sempre o menor possível, pois o ar, além do oxigênio, sempre traz consigo uma massa elevada de nitrogênio, gás inerte e que arrasta para a chaminé parte do calor gerado na reação, resultando em uma perda de desempenho da utilização do calor do combustível. Ou seja, se a correta proporção entre o ar e o combustível não for mantida, haverá insuficiência ou excesso de ar, além do mínimo recomendável e, conseqüentemente, perda de eficiência no processo, como representado no Gráfico 4.1.

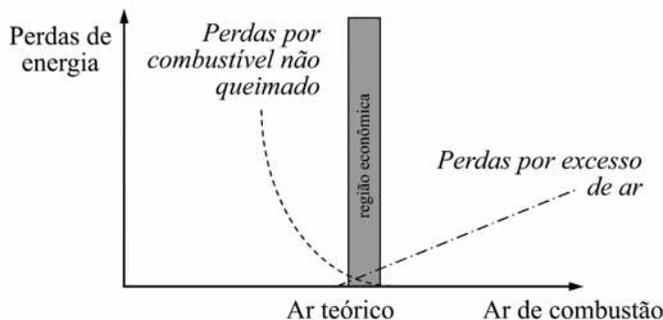


Gráfico 4.1 - Efeito do excesso de ar sobre as perdas em sistemas de combustão

O excesso mínimo de ar a ser adotado depende tanto do tipo de combustível como do sistema de combustão, já que se trata de buscar uma mistura adequada entre o combustível e o comburente. Em geral, gases combustíveis permitem uma mistura adequada sem dificuldade, e os excessos de ar situam-se usualmente entre 5 a 10%. Para um combustível líquido, em função de sua viscosidade e do sistema de atomização empregado no queimador, pode ser requerido menos de 10% de excesso de ar ou mais de 30%. No caso dos combustíveis sólidos o excesso de ar depende muito da granulometria e da forma de alimentação do combustível. Um combustível bem moído e alimentado em suspensão pode comportar-se como um óleo pesado, enquanto lenha em pedaços grandes sobre uma grelha fixa pode requerer de 60 a 120% de excesso de ar.

A determinação prática do excesso de ar é usualmente realizada por meio de medidas de composição dos gases de combustão em base seca; isto é, sem serem afetadas pelo teor de umidade eventual do combustível queimado. As medidas mais importantes são os teores de dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2). Tradicionalmente, estas medidas eram realizadas utilizando métodos químicos de absorção seletiva, mediante instrumentos do tipo aparelho de Orsat, mas atualmente são também largamente empregados sistemas eletrônicos, trabalhando com células sensoras aos produtos de combustão.

As expressões a seguir, também disponibilizadas no disquete anexo, permitem conhecer o excesso de ar a partir de medidas dos teores de CO_2 e O_2 . Adicionalmente, alguns instrumentos fornecem medidas de outros componentes nos gases de combustão, de pouco interesse para fins de determinação do excesso de ar e úteis para avaliar a homogeneidade da mistura ar/combustível e a formação de poluentes gasosos, como o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x).

$$\lambda = \left[\frac{\left(\frac{x}{\% \text{CO}_2} \right) - x - k - 3,76 A}{4,76 A} \right] \quad (4.4)$$

$$\lambda = \left[\frac{\% \text{O}_2 (x - k - 3,76 A)}{A (1 - 4,76 (\% \text{O}_2))} \right] \quad (4.5)$$

em que:

$$\lambda - \text{coeficiente de excesso de ar} = \frac{\text{ar real de combustão}}{\text{ar estequiométrico}}; \quad (4.6)$$

$$A - \text{coeficiente estequiométrico} = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} + k; \quad (4.7)$$

% CO₂ - teor de dióxido de carbono nos produtos de combustão;

% O₂ - teor de oxigênio nos produtos de combustão; e

x, y, z e k - teores molares respectivamente do carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre do combustível (como nas expressões anteriores).

A relação entre a composição dos gases de combustão, usualmente amostrados na base da chaminé, e o excesso de ar é exemplificada no Gráfico 4.2, com valores válidos para o óleo combustível tipo B1 (BPF). Para quaisquer outros combustíveis pode ser utilizada a planilha Cálculos de Combustão, que configura numérica e graficamente o excesso de ar como função dos teores de CO₂ e O₂, de efetiva aplicação no estudo do desempenho de sistemas de produção de vapor.

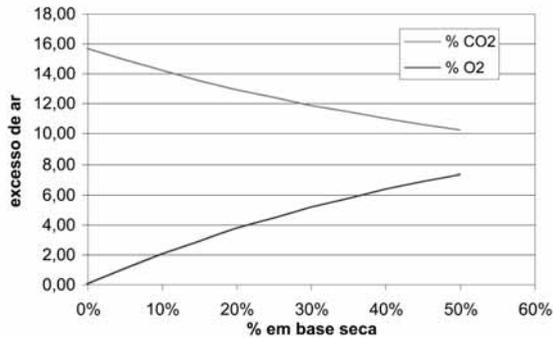


Gráfico 4.2 - Relação entre excesso de ar e teores de dióxido de carbono e oxigênio para óleo combustível típico B1

A seguir, são resumidas as principais exigências de um eficiente processo de combustão, do ponto de vista das proporções entre o ar e o combustível:

- O comburente deve estar em quantidade suficiente em relação ao combustível para que a reação química da combustão seja completa. Deve-se trabalhar com o mínimo de excesso de ar, suficiente para a total oxidação do combustível, sem indícios significativos de monóxido de carbono e fuligem.
- O comburente deve formar com o combustível uma mistura homogênea. O uso de queimadores corretos para o combustível, bem operados, assegura que o ar é fornecido à reação de combustão sem existirem zonas de mistura muito rica ou muito pobre e garantindo completa oxidação do combustível.

- No caso de combustíveis líquidos, a adequada viscosidade é um fator essencial para uma queima correta. Quanto menor a viscosidade do combustível, melhor será a sua pulverização; ou seja, mais fácil será a sua divisão em gotículas e, portanto, melhor sua mistura com o ar. Como a viscosidade varia com a temperatura, o preaquecimento do combustível é fundamental para se atingirem os limites de viscosidade necessários para uma boa pulverização. A viscosidade de um óleo combustível pode variar por outros motivos, como sua composição, e a temperatura de aquecimento deve ser ajustada, quando necessário. Entretanto, por uma questão de segurança, esta temperatura não deve aproximar-se muito do ponto de fulgor do óleo combustível.
- No caso de combustíveis sólidos, por idênticas razões, sua granulometria é de extrema importância para obterem-se as condições adequadas de queima. Quanto mais reduzido o tamanho de uma partícula, maior será a área de contacto com o comburente e melhores serão as condições para a reação de combustão.

4.4 Poder calorífico dos combustíveis

A energia térmica fornecida durante a queima dos combustíveis pode ser avaliada por seu poder calorífico, em geral, apresentado para sólidos e líquidos por unidade de massa e para gases por unidade de volume, referidas neste caso a pressão atmosférica e a temperatura de 0°C. Como comentado, a água, usualmente presente nos produtos de combustão, resultante da oxidação do hidrogênio, pode apresentar-se em diferentes estados (líquido e vapor). São definidos dois tipos de poder calorífico: o Poder Calorífico Superior (PCs), quando a água está na forma líquida, estado típico nas condições de ensaio de combustíveis, pouco aplicado em situações práticas; e Poder Calorífico Inferior (PCi), quando a água apresenta-se como vapor, situação que efetivamente ocorre nos produtos de combustão nas chaminés. Naturalmente, dependendo do teor de hidrogênio do combustível, o Poder Calorífico Superior é cerca de 10% maior que o Poder Calorífico Inferior.

A Tabela 4.4 apresenta valores para o poder calorífico inferior de alguns combustíveis em sua condição típica de utilização em caldeiras, parâmetro de interesse para determinar a eficiência na geração de vapor.

TABELA 4.4 - PODER CALORÍFICO INFERIOR PARA ALGUNS COMBUSTÍVEIS

COMBUSTÍVEL	PODER CALORÍFICO INFERIOR	DENSIDADE
Óleo combustível B1	9.590 kcal/kg	1000 kg/m ³
Gás natural (típico)	8.800 kcal/m ³	-
GLP	11.100 kcal/kg	-
Lenha	3.100 kcal/kg	400 kg/m ³
Bagaço de cana	2.130 kcal/kg	-
Carvão vegetal	6.460 kcal/kg	260 kg/m ³
Carvão mineral ¹	2.850 kcal/kg	-

¹ Carvão vapor sem especificação, podendo ser especificados produtos com PCs Superior.

4.5 Tecnologia de combustão

Para a realização prática de processos de combustão, são necessários equipamentos capazes de proporcionar a mistura do ar e do combustível em condições seguras e controladas, sem perdas. A seguir, são apresentados os componentes dos sistemas de produção de vapor em que ocorrem tais reações de combustão, que influem decisivamente em seu desempenho.

4.5.1 Fornalhas

Fornalha é a denominação genérica que se dá ao local onde se queima o combustível e de onde saem os produtos da combustão. Pode ser formada por queimadores (para combustíveis líquidos e gasosos), grelhas (para combustíveis sólidos) ou câmaras de combustão.

A câmara de combustão é um volume adequadamente dimensionado, no qual se desenvolve a chama e se completa a combustão, além de propiciar a proteção e os suportes necessários para os queimadores e grelhas. De forma geral, a fornalha deve evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar sua temperatura do combustível até a combustão, proporcionando a condição ideal uma combustão completa, criar turbulência para misturar o ar e o combustível, e impedir a troca de calor entre os gases quentes produzidos e o ambiente. No interior da fornalha as paredes devem ser revestidas com uma camada de tijolos refratários, responsáveis por reter o calor no interior da fornalha. Por isso, devem suportar altas temperaturas e apresentar resistência ao choque térmico

e dilatação quase nula. A fixação desses tijolos é feita com argamassa refratária. Os principais componentes dos materiais refratários são: óxido de sílica, óxido de magnésio, grafite e silício.

As fornalhas podem ser classificadas, essencialmente, em duas categorias::

- *fornalhas com combustão sobre suporte.* Englobam todas as fornalhas que queimam combustíveis sólidos a granel, grosseiramente divididos, picados e/ou britados. Segundo a qualidade (teor de cinzas e voláteis) e quantidade de combustível manipulado, seu grau de divisão e mecanização da alimentação, podem ser grelhas fixas, inclinadas, basculantes ou rotativas; e
- *fornalhas para queima em suspensão.* São usadas quando se queimam óleo, gases ou combustíveis sólidos pulverizados, utilizando para alimentar o combustível equipamento especial, chamado maçarico, queimador ou combustor, responsável pela dispersão do combustível na fornalha de forma homogênea.

4.5.2 Queimadores

Conforme o tipo de combustível empregado, as configurações dos queimadores podem variar bastante, como se apresenta a seguir:

Queimadores para combustíveis líquidos:

Os combustíveis líquidos são queimados nas câmaras de combustão, sempre em suspensão, pulverizados por meio de vários processos, que devem ser capazes de atomizar bem o combustível, mesmo sob cargas parciais.

■ Pulverização a ar

O óleo escoar por gravidade ou por impulsão de uma bomba de baixa pressão. O ar é insuflado por ventilador, sendo o veículo responsável pela pulverização do óleo em gotículas (Fig. 4.1). Conforme a pressão do ar, os queimadores são denominados de *baixa pressão* (até 500 mmca) ou de *média pressão* (da ordem de 1000 mmca). São indicados para unidades de pequeno porte, queimando uma quantidade máxima de 50 kg/h de óleo. O ar de pulverização, denominado ar *primário*, representa 20% do ar total necessário à combustão. Operam com 30 a 40% de excesso de ar e apresentam uma pulverização não uniforme, dificultando a regulação da queima. Uma concepção mais moderna deste tipo procura dar uma rotação aos dois fluxos, o que tem permitido uma melhora na sua performance. Este tipo de queimador é exemplificado na Figura 4.2.

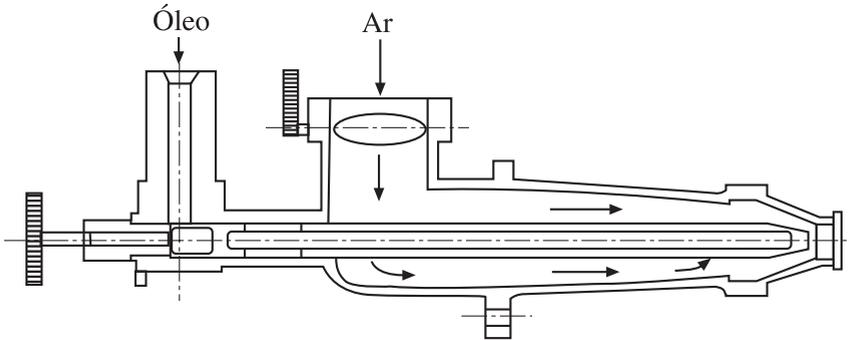


Figura 4.1 - Maçarico de óleo com pulverização a ar

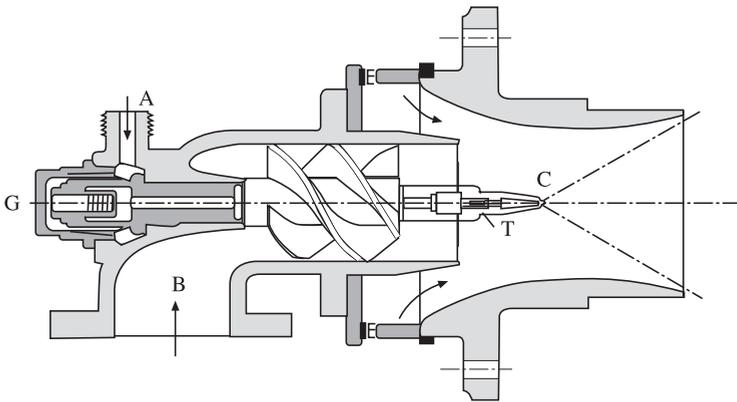


Figura 4.2 - Queimador de óleo com pulverização a ar comprimido e efeito rotação do fluido auxiliar primário
Fonte: Pêra (1990)

■ Pulverização a vapor

Substitui o ar pelo vapor produzido na própria caldeira, promovendo uma pulverização mais fina e fortemente acentuada pelo aquecimento. Tem o inconveniente de parte do calor produzido na combustão ser consumido pelo vapor, quando este for saturado. A Figura 4.3 apresenta o dispositivo que mistura combustível e vapor, para facilitar a atomização e melhorar a mistura com o ar.

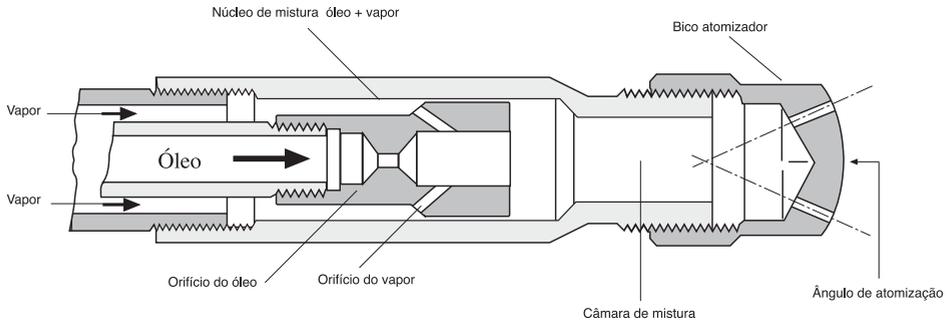


Figura 4.3 - Maçarico de queimador a óleo com atomização a vapor

■ Queimador de copo rotativo

Uma concepção mais complexa e de bom desempenho é o queimador de “copo rotativo”, largamente aplicado nos geradores de vapor limitados à capacidade de queima de 500 kg óleo/h, embora alguns tipos especiais com alta rotação (10000 rpm) possam chegar à capacidade de 3000 kg óleo/h. O funcionamento baseia-se na formação de um filme de óleo no interior de um copo tronco cônico girando a alta rotação (3600 rpm), que projeta o combustível na forma de um anel cônico de encontro a um fluxo de ar rotativo de alta pressão, como mostrado na Figura 4.4. Uma das vantagens deste tipo de queimador é sua razoável capacidade de modulação de carga.

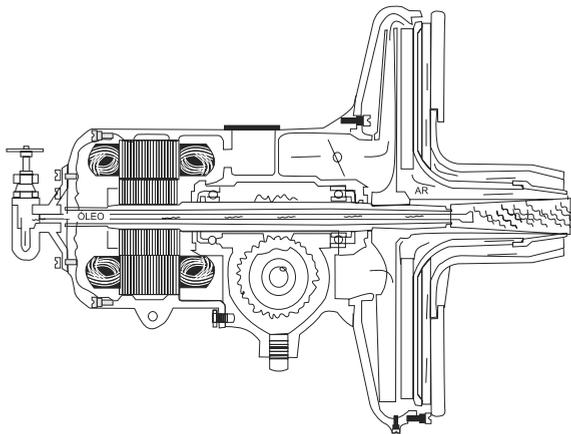


Figura 4.4 - Queimador tipo copo rotativo
Fonte: Pêra (1990)

■ Pulverização mecânica

Caracteriza-se pela ausência completa de peças rotativas no queimador, garantindo a pulverização do óleo por escoamento estrangulado em alta velocidade através de orifícios de pequenas dimensões (Fig. 4.5). A energia necessária para o líquido atravessar o orifício em alta velocidade é mantida por uma bomba de engrenagens.

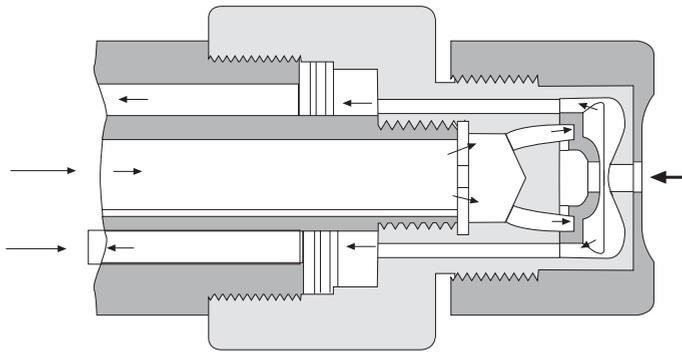


Figura 4.5 - Bico queimador de óleo via pulverização mecânica
Fonte: Pêra (1990)

■ Queimadores de combustíveis gasosos

Os combustíveis gasosos são os mais simples de serem queimados, pois a mistura com o comburente se processa de forma muito mais fácil do que com qualquer outro combustível, podendo ainda ter sua velocidade de ignição aumentada mediante pré-aquecimento do suprimento do comburente. Basicamente, distinguem-se dois tipos: queimadores de mistura; e queimadores de difusão. Os queimadores de mistura promovem a mistura do ar com o gás antes de injetá-los na câmara de combustão, como apresentado na Figura 4.6. Já os queimadores de difusão têm por princípio injetar ambos os fluidos separadamente, proporcionando a mistura de ambos no interior da câmara de combustão, sendo menos empregados.

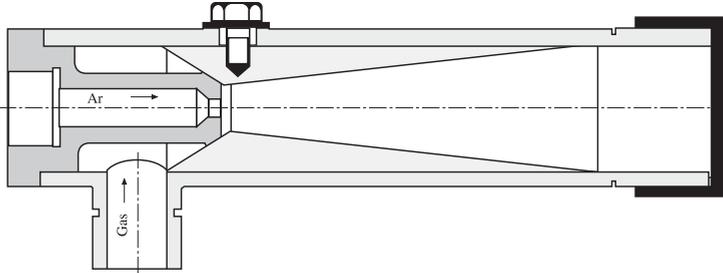
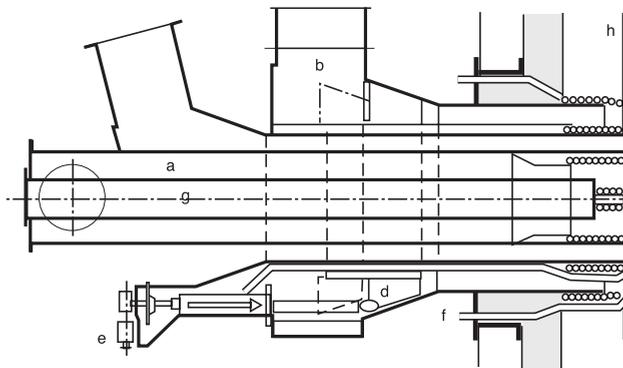


Figura 4.6 - Esquema de um queimador de mistura para gases
Fonte: Pêra (1990)

■ Queimadores de combustíveis sólidos pulverizados

A utilização dos combustíveis sólidos tem como exemplo mais importante o carvão mineral utilizado nas grandes unidades geradoras de vapor das centrais termoelétricas, sendo que existem outros materiais pulverizados e resíduos de processos industriais, como é o caso do bagaço de cana, da borra de café, da serragem e de resíduos florestais macerados, que são particulados e queimados em suspensão, quando insuflados na câmara de combustão (Fig. 4.7).

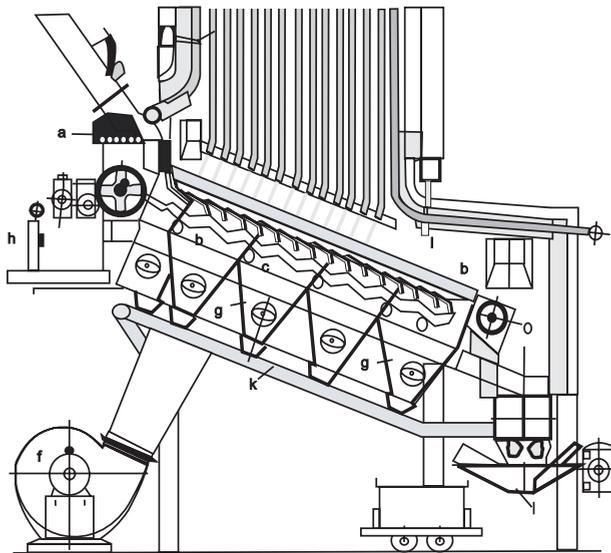


a - ar de núcleo b - câmara de ar c - mistura de pó e ar d - difusor de torção
e - ajuste do difusor f - tubos de refrigeração g - queimador de ignição h - tubos da parede

Figura 4.7 - Queimador de turbilhão para carvão pulverizado

Queimadores de combustíveis sólidos.

Nas pequenas caldeiras, o combustível, lenha em toras, é colocado manualmente sobre um conjunto de grelhas fixas. Para as caldeiras de maior capacidade, utilizam-se sistemas com grelhas móveis ou deslizantes. A lenha, normalmente picada, é transportada por meio de correias transportadoras, dos silos até aos dosadores e alimentadores (Fig. 4.8).



- | | | |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| a - alimentação de carvão | b - barras atificadoras | c - barras de movimento |
| d - acionamento da grelha | e - cilindro de saída | f - ventilador principal |
| g - câmaras inferiores | h - controle de ar | i - saída de escória |
| k - saída de finos | l - bocais de ar secundário | |

Figura 4.8 - Caldeira aquotubular de grelhas móveis.

4.6 Tiragem

É o processo de retirada dos gases provenientes da combustão, da caldeira para a atmosfera. Dependendo do uso de energia externa, sua tiragem pode ser efetuada de várias maneiras: natural, forçada ou mista.

- Natural

Quando, normalmente, sem a ajuda de equipamentos especiais, o ar entra na fornalha, alimenta a chama e sai pela chaminé, graças à diferença de temperaturas na sua base e no seu topo.

- Forçada ou induzida

Os gases são eliminados com a ajuda de ventiladores sopradores. Pode apresentar várias disposições construtivas. Suas dimensões, porém, dependem da capacidade da caldeira para um suficiente suprimento de ar de combustão e para que os gases sejam totalmente eliminados. Nas caldeiras em que os gases são eliminados através de exaustores, aspirando os gases e projetando-os para a atmosfera, a tiragem é chamada *induzida* (Fig. 4.9).

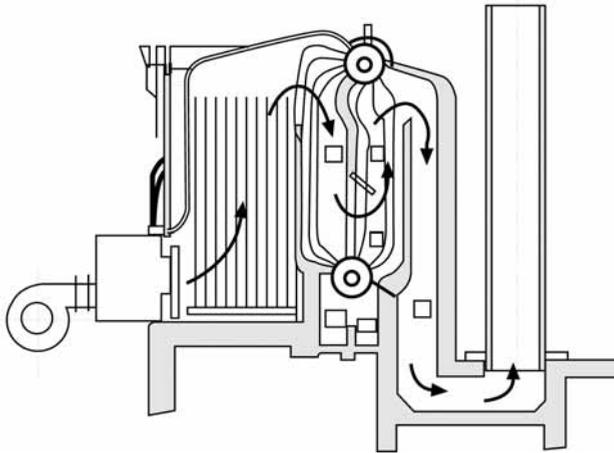


Figura 4.9 - Tiragem Forçada

Fonte: Pêra (1990)

As caldeiras que possuem este tipo de tiragem são chamadas de *caldeiras despressurizadas*. Elas precisam ter muito boa vedação, para evitar a entrada de ar falso, através de suas paredes ou duplos invólucros (Fig. 4.10).

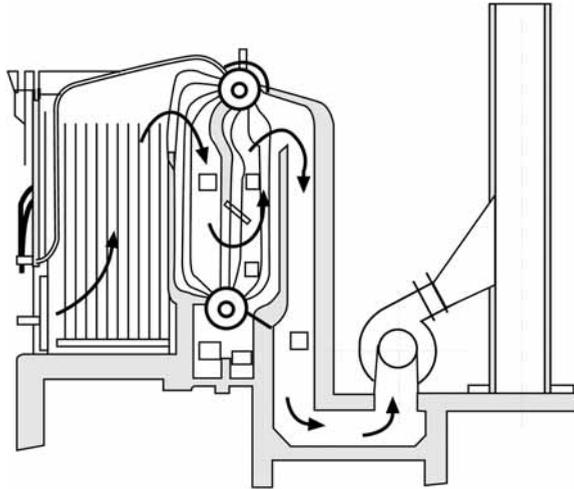


Figura 4.10 - Tiragem Induzida
Fonte: Pêra (1990)

■ Mista ou balanceada

Neste sistema são empregados dois ventiladores, sendo que um deles tem a finalidade de introduzir o ar na caldeira (ventilador soprador) e o outro tem a finalidade de retirar o ar da caldeira (ventilador exaustor), conforme esquema da Figura 4.11.

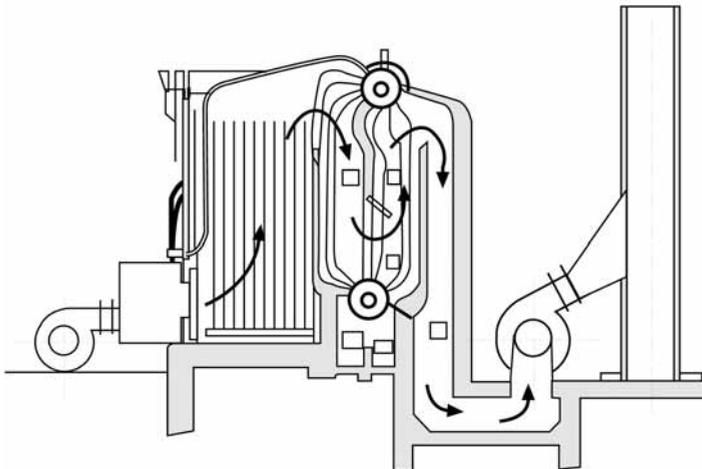


Figura 4.11 - Tiragem Mista
Fonte: Pêra (1990)

5 Geradores de Vapor

Atualmente, devido a todos os aperfeiçoamentos e intensificação da produção industrial, os geradores de vapor fornecem o vapor indispensável a muitas atividades, não só para movimentar máquinas, mas também para limpeza, esterilização, aquecimento e participação direta no processo produtivo, como matéria-prima. Além da indústria, outras empresas utilizam cada vez mais vapor gerado pelas caldeiras, como restaurantes, hotéis, hospitais e frigoríficos.

O mais importante *gerador de vapor é a caldeira*, que é, basicamente um trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer. É constituída por diversos equipamentos integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível e maior segurança. Esta definição abrange todos os tipos de caldeiras, sejam as que vaporizam água, mercúrio ou outros fluidos e que utilizam qualquer tipo de energia: térmica (seja convencional, como combustíveis, ou não convencional, como energia nuclear ou solar) ou, mesmo, elétrica. Quase sempre a fonte de calor é um combustível especificamente utilizado com esta finalidade, mas podem ser aproveitados também calores residuais de processos industriais, escape de motores diesel ou turbinas a gás, dando ênfase à racionalização energética de sistemas complexos. Neste caso, o equipamento é chamado *caldeira de recuperação*. Algumas vezes, o fluido permanece no estado líquido, apenas com temperatura elevada para ser aproveitado nos processos de aquecimento (calefação), formando, deste modo, caldeiras de água quente ou aquecedores de água. Para produzir o vapor d'água, é necessário que haja a combustão na caldeira.

5.1 Definições iniciais

■ Capacidade do gerador de vapor

É o quanto a caldeira produz de vapor, podendo ser representada por:

- a) Quilo de vapor ou tonelada de vapor por hora kg/h ou t/h;
- b) BHP - "Boiler Horse-Power", onde 1 BHP \approx 15,65 kg/h; ou
- c) Quilo de vapor por metro quadrado kg/m² de superfície de aquecimento.

■ *Superfície de aquecimento*

É a área de tubulação (metálica) que recebe o calor dos gases quentes, responsável por vaporizar a água (m²).

■ *Calor útil*

É a parcela de calor produzida pelo combustível que se transferiu para a água, formando vapor.

■ *Eficiência térmica*

É a relação entre o calor útil e o conteúdo térmico total do combustível queimado.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_v (h_{v_s} - h_{v_e})}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (5.1)$$

em que:

\dot{m}_v, \dot{m}_c - vazão em massa de vapor fornecido e de combustível [kg/h], respectivamente;

h_{v_s}, h_{v_e} - entalpia do vapor de saída, entrada [kJ/kg]; e

PCI - poder calorífico inferior do combustível queimado [kJ/kg].

5.2 Componentes clássicos

Atualmente, os geradores de vapor de grande porte são constituídos de uma associação de componentes, de maneira a constituírem um aparelho complexo. São o exemplo mais completo que se pode indicar, principalmente quando destinados à queima de combustível sólidos, conforme descrito no Quadro 5.1 e mostrado no desenho da Figura 5.1.

QUADRO 5.1 - COMPONENTES CLÁSSICOS DE UMA CALDEIRA

(A) Cinzeiro	Lugar onde se depositam cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.
(B) Fornalha	Local onde se inicia o processo de queima seja de combustíveis sólidos (líquidos ou gasosos).
(C) Câmara de combustão	Volume onde se deve consumir todo o combustível antes de os produtos de combustão atingirem e penetrarem no feixe de tubos. Por vezes, confunde-se com a própria fornalha, dela fazendo parte; outras vezes, separa-se completamente.
(D) Tubos Evaporadores	Correspondem ao vaso fechado e pressurizado com tubos contendo água no seu interior, a qual, ao receber calor, transforma-se em vapor.
(E) Superaquecedor	Responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira.
(F) Economizador	Componente onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
(G) Pré-aquecedor de ar ou pré-ar	Componente cuja função é aquecer o ar de combustão para introduzi-lo na fornalha, aproveitando o calor sensível dos gases da combustão.
(H) Canais de gases	São trechos intermediários ou finais de circulação dos gases de combustão até a chaminé. Podem ser de alvenaria ou de chapas de aço, conforme a temperatura dos gases que neles circulam.
(I) Chaminé	É a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promove a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo chamado <i>efeito de tiragem</i> .

Tomando por base uma unidade mais complexa, a Figura 5.1 permite identificar os componentes clássicos e o princípio de funcionamento da instalação.

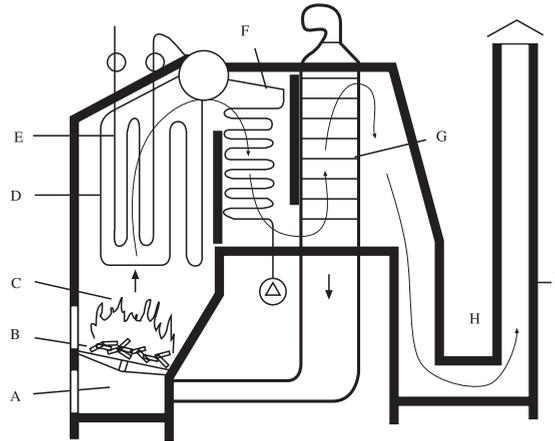
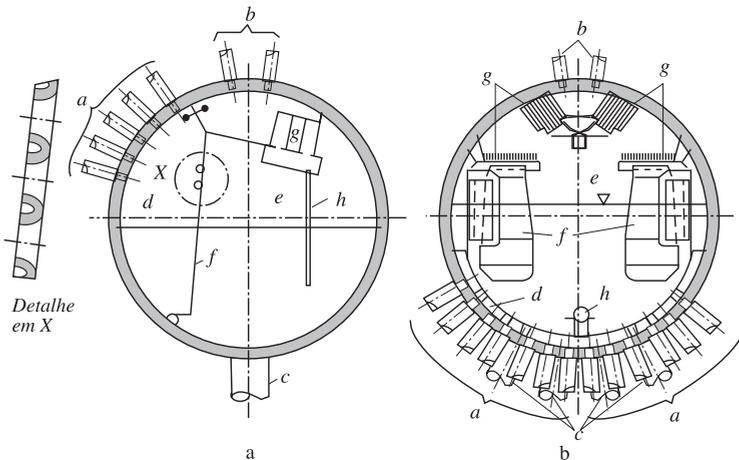


Figura 5.1 - Componentes de uma caldeira complexa
 Fonte: Pêra (1990)

Detalhes construtivos do tubulão:



- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| a - tubos de sobrecarga | b - tubos de vapor saturado |
| c - tubos de queda | d - câmara de descarga |
| e - câmara de vapor | f - ciclone |
| g - chapas de choque | h - tubo de descarga |

Figura 5.2 - Cortes em duas seções de um tubulão de vapor

5.3 Classificação

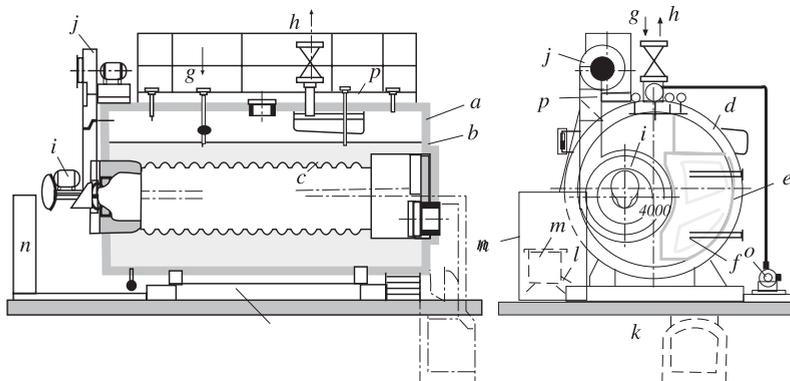
As caldeiras podem ser classificadas de diversas formas. Por exemplo:

- Quanto à disposição da água em relação aos gases:
 - a) flamotubulares; ou
 - b) aquotubulares.
- Quanto à energia empregada no aquecimento:
 - a) a partir de combustíveis: sólidos; líquidos; gasosos;
 - b) elétricas: jatos-de-água; eletrodos submersos; resistores; ou
 - c) caldeiras de recuperação; gases de outros processos; recuperação química.
- Quanto à montagem:
 - a) caldeiras pré-montadas (compactas); ou
 - b) caldeiras montadas em campo.
- Quanto à sustentação:
 - a) caldeiras auto-sustentadas;
 - b) caldeiras suspensas; ou
 - c) sustentação mista.
- Quanto à circulação de água:
 - a) circulação natural; ou
 - b) circulação forçada.
- Quanto ao sistema de tiragem:
 - a) tiragem natural;
 - b) tiragem forçada; ou
 - c) tiragem balanceada ou induzida.

5.4 Caldeiras flamotubulares

Este foi o primeiro tipo de caldeira construída. É também chamada de *tubo-de-fogo*,

tubo-de-fumaça ou *pirotubular*, por causa dos gases quentes provenientes da combustão que circulam no interior dos tubos em um ou mais passes, ficando a água por fora dos mesmos. De construção simples, mesmo com o aparecimento de caldeiras mais modernas ainda continua em uso. Posteriormente, com alguns aperfeiçoamentos, passou a chamar-se *caldeira escocesa*. Na Figura 5.3, nota-se que a caldeira tipo flamotubular não passa de um cilindro externo que contém água e um cilindro interno destinado à fornalha. Sua tiragem ou saída de gases é normal. A carcaça é construída de chapas, que variam de espessura de acordo com o porte da caldeira, e a sua pressão pode variar entre 5 a 10 kgf/cm², sendo que as maiores unidades atingem a produção de 6 tv/h, saturado e pressões inferiores a 17 kgf/cm².



- | | | |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| a - corpo da caldeira | b - câmara de inversão | c - tubo de fogo |
| d - câmara de descarga | e - câmara anterior | f - ciclone |
| g - chapas de choque | h - tubo de descarga | i - queimador copo rotativo |
| j - ventoinha | k - quadro inferior | l - bombas de óleo |
| m - pré-aquecedor de óleo | n - painel de comando | o - bombas de alimentação |
| p - passarela | | |

Figura 5.3 - Esquema de uma caldeira flamotubular a óleo

5.4.1 Caldeira flamotubular compacta

É de pequeno porte, na qual o combustível é queimado em uma câmara apropriada, hermeticamente vedada, geralmente de forma cilíndrica, reta ou ondulada, denominada fornalha. Os gases provenientes do processo de queima (combustão) são conduzidos por meio de tiragem natural ou forçada para o ambiente, passando antes por uma chaminé. Os gases quentes circulam dentro do feixe tubular, transmitindo para suas paredes parte da energia térmica, pelos processos simultâneos de condução e convecção de calor. Tanto a câmara

ra de queima quanto o feixe tubular deverão estar totalmente cobertos externamente por água, a qual absorverá o calor, iniciando o aquecimento e a mudança de estado.

As partes que recebem o calor da combustão ou dos gases precisam ser resfriadas, pela própria água a ser vaporizada, ou isoladas termicamente, por meio refratários apropriados. São muito utilizadas em locais que requerem o uso de vapor saturado em vazões reduzidas, de 1 a 15 t/h e baixas pressões, de 7 a 20 kg/cm², como em hospitais, lavanderias, cervejarias, hotéis e indústrias de pequeno e médio porte.

A Figura 5.4 mostra uma caldeira flamotubular compacta, com seus principais elementos constitutivos.

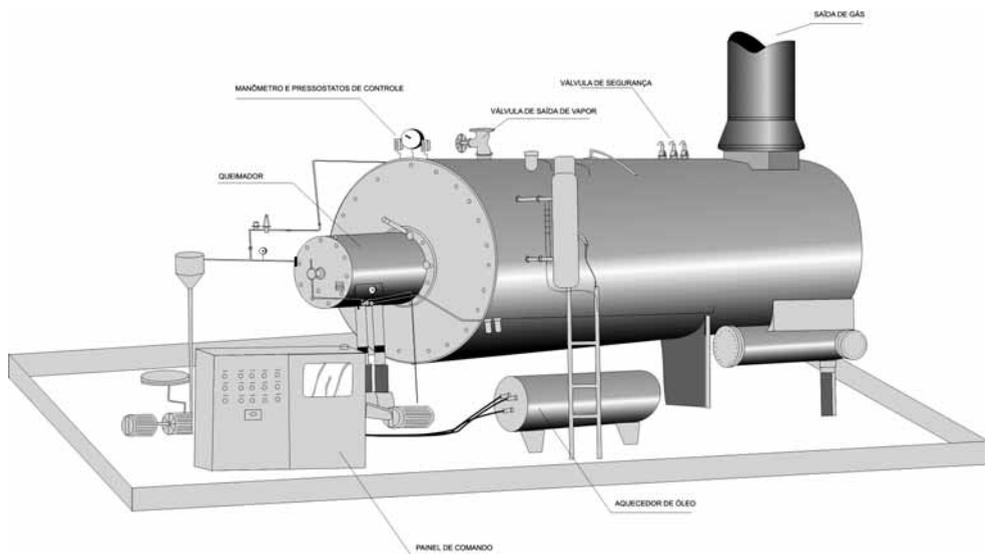


Figura 5.4 - Caldeira flamotubular compacta, com seus principais componentes

5.4.2 Caldeiras verticais

Este tipo de caldeira tem as mesmas características da caldeira horizontal multitubular. Os tubos são colocados verticalmente dentro do cilindro e a fornalha interna fica no corpo do cilindro. Existem tipos cuja fornalha é externa. Esta caldeira é usada em locais onde o espaço é reduzido. Não requer grande quantidade de vapor, mas alta pressão. Os gases resultantes da queima na fornalha sobem pelos tubos e aquecem a água que se encontra por fora dos mesmos.

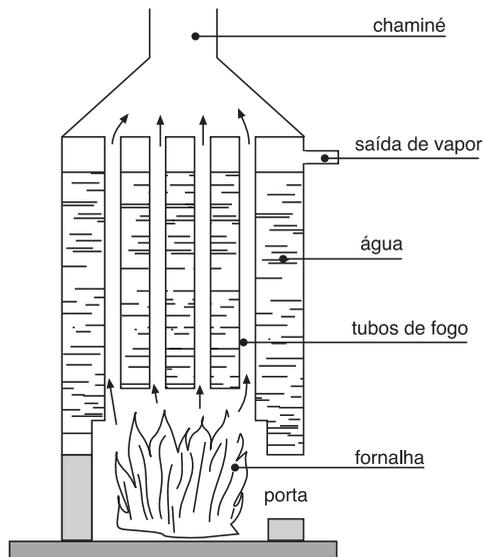


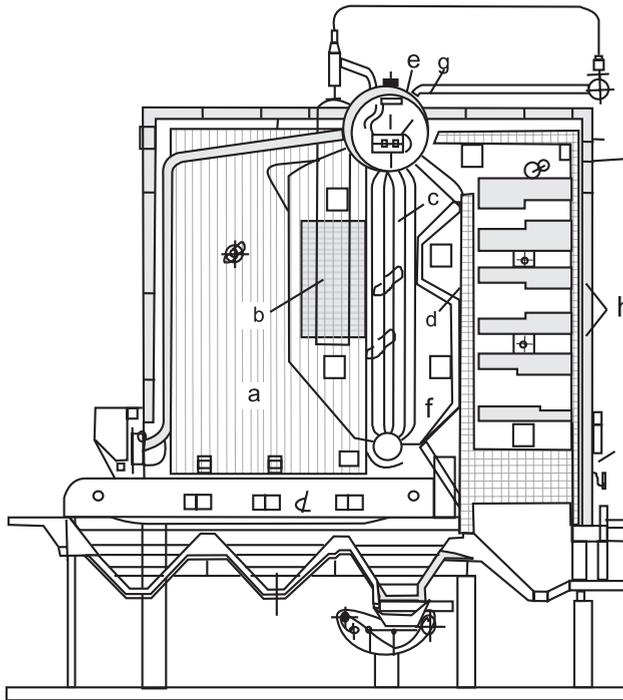
Figura 5.5 - Caldeira flamotubular vertical

Pode ser de fornalha interna, como mostra a Figura 5.5, ou de fornalha externa. Geralmente, as fornalhas internas são envolvidas por uma câmara de água formada pelo prolongamento do corpo cilíndrico. A caldeira vertical de fornalha externa é aplicada principalmente quando é usado combustível de baixo PCI (bagaço de cana, casca de laranja, etc.).

5.5 Caldeiras aquotubulares

Somente foi possível a obtenção de maiores produções de vapor a pressões elevadas e altas temperaturas com o aparecimento deste tipo de caldeira (tubos de água). A Figura 5.6 representa uma seção transversal de uma caldeira aquotubular com dois tambores (tubulão de vapor e o tubulinho, ou tubo de lama). Um feixe tubular de água compõe a

parte principal de absorção de calor, sendo que no interior dos tubos circula a água e por fora os gases quentes através do caminho formado pela alvenaria e chicanas internas.



- | | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------|
| a | câmara de combustão | b | superaquecedor |
| c | feixe de tubos | d | tubos de queda |
| e | tambor superior | f | tambor inferior |
| g | acessórios do tubulão | h | economizador |
| i | pré-aquecedor de ar | | |

Figura 5.6 - Caldeira aquotubular para combustível sólido

A água é vaporizada nos tubos que constituem a parede mais interna. Recebendo calor primeiro, vaporiza e sobe até o tambor superior, dando lugar à nova quantidade de água fria que será vaporizada, e assim sucessivamente. Este tipo de circulação de água, provocada apenas pela diferença de peso específico entre a água ascendente e descendente, é característica das chamadas *caldeiras com circulação natural*. À medida que a caldeira aquotubular aumenta sua capacidade, aumentam também seu tamanho, a quanti-

dade de tubos e, por conseqüência, as perdas de cargas no circuito hidráulico, tornando a circulação por meio de bombas necessária. São as chamadas caldeiras de *circulação forçada*. A produção de vapor nestes tipos de caldeira pode atingir capacidades de 600 até 750 t/h com pressões de 150 a 200 kgf/cm² temperaturas de 450 a 500°C, existindo unidades com pressões críticas e supercríticas.

A flexibilidade permitida pelo arranjo dos tubos que constituem os feixes possibilita uma vasta variedade de tipos construtivos, conforme a classificação a seguir:

- caldeiras aquotubulares de tubos retos, podendo os tambores estarem colocados no sentido longitudinal ou transversal; e
- caldeiras aquotubulares de tubos curvos, que podem apresentar de um a mais de quatro tambores, no sentido longitudinal ou transversal.

5.5.1 Circulação da água em caldeiras aquotubulares

Os aços aplicados na construção das caldeiras expostas aos gases quentes precisam ser continuamente resfriados por água ou mistura água-vapor para conservarem suas qualidades de resistência, pois até a temperatura limite de 450°C para os aços carbonos comuns, 590°C para os aços martensíticos e 650°C para outras ligas martensíticas estes materiais conservam suas propriedades mecânicas. Ultrapassando estes limites, as propriedades destes materiais utilizados na construção de caldeiras começam a diminuir sua resistência mecânica. Assim, o resfriamento da superfície metálica que é submetida a tais temperaturas é vital para a segurança do equipamento.

Numa unidade convencional, a circulação da água se processa livremente, graças à tendência natural provocada pela diferença de pesos específicos entre a água situada nas partes mais frias da caldeira e aquela contida nas zonas de alta temperatura dos gases. A Figura 5.7 apresenta quatro diferentes esquemas, cada um esclarecendo como se processa a circulação natural da água no interior dos tubos, que fica mais comprometida à medida que a pressão se eleva. Daí conclui-se que a circulação controlada por meios forçados é fundamental nas caldeiras de altas pressões.

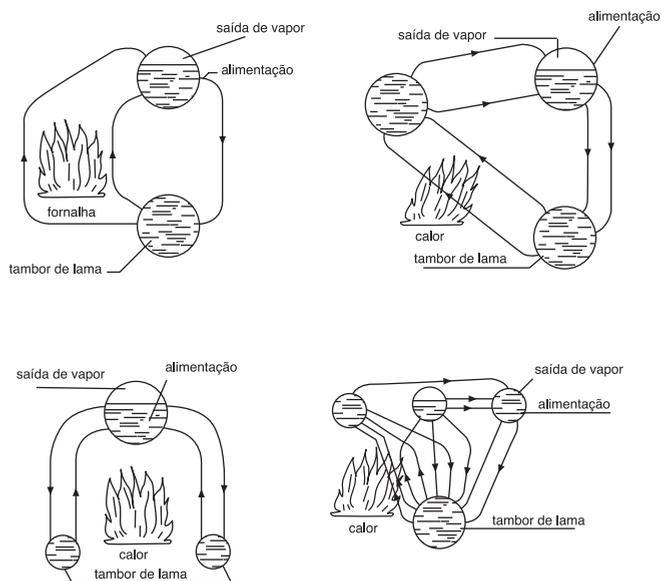


Figura 5.7 - Diferentes concepções da circulação de água no interior dos tubos
Fonte: Pêra (1990)

5.6 Comparações entre caldeiras flamotubulares e aquotubulares

As vantagens e desvantagens dos dois tipos de configuração construtiva de caldeiras levam em consideração os seguintes elementos:

5.6.1 Grau de combustão e vaporização específica

- *Grau de combustão* - Unidade de massa de combustível queimado, por unidade de tempo e por unidade de área da superfície da grelha (G), no caso de caldeiras a carvão, expresso em $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(G)$. Para caldeira a petróleo, kg de petróleo queimado por h e m^2 de superfície de aquecimento (S) ou m^3 de volume da câmara de combustão (V), expresso em $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(S)$ ou $\text{kg}/\text{m}^3\text{h}(V)$.
- *Vaporização específica* - Para caldeira a carvão, kg de vapor produzido por h e m^2 de superfície de grelha, expresso em $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(G)$, para caldeiras a petróleo, kg de vapor produzido por h e m^2 de superfície de aquecimento (S), expresso em $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(S)$.

Caldeiras aquotubulares permitem desenvolver graus de combustão muito superiores

aos obtidos nas flamotubulares, pelo fato de a fornalha não formar parte integral da caldeira. Desta forma, podem ser construídas câmaras de combustão amplas, especialmente apropriadas para a queima de petróleo.

A Tabela 5.1 apresenta dados sobre graus de combustão e vaporização específica de caldeira tubular e de caldeira aquotubular.

TABELA 5.1 - GRAUS DE COMBUSTÃO E VAPORIZAÇÃO ESPECÍFICA DE CALDEIRA TUBULAR E DE CALDEIRA AQUOTUBULAR

TIPO DE CALDEIRA	GRAU DE COMBUSTÃO			VAPORIZAÇÃO ESPECÍFICA		
	CARVÃO	PETRÓLEO		CARVÃO	PETRÓLEO	
	kg/m ² h(G)	kg/m ² h(S)	kg/m ² h(V)	kg/m ² h(G)	kg/m ² h(S)	kg/m ² h(V)
Flamotubular	120 - 180	1,5 - 2,5	-	1100 - 1400	30 - 35	30 - 35
Aquotubular	250 - 400	5,1 - 8	150 - 200	1800 - 3300	35 - 50	70 - 100

A Tabela 5.1 permite concluir que a caldeira aquotubular possui maior vaporização específica que a flamotubular, o que significa que pode ser obtida uma elevada capacidade com caldeiras de pouco peso e volume.

Como a capacidade ou potência de uma caldeira, consideradas constantes as outras condições, depende da extensão e posição da sua superfície de aquecimento com respeito à fornalha, na aquotubular, os tubos vaporizadores permitem obter uma considerável área de aquecimento em um espaço reduzido, especialmente na do tipo leve, constituída com tubos de pequeno diâmetro limitando a câmara de combustão.

5.6.2 Peso e volume

Para igual capacidade, a caldeira aquotubular ocupa um volume menor, sendo também de peso menor que a flamotubular. A diminuição de peso é conseqüência direta da eliminação dos invólucros, casco ou corpo cilíndrico de grande diâmetro e espessura, como também da redução da quantidade de água, aproximadamente a décima parte da contida na caldeira cilíndrica.

5.6.3 Pressão e grau de superaquecimento do vapor

As maiores caldeiras flamotubulares construídas atingem valores de pressão da ordem

de 25 kg/cm². Como a espessura com que deve ser construído o casco aumenta proporcionalmente com a pressão e diâmetro, observar-se-á que, ultrapassando determinados limites, seria necessário construir caldeiras com chapa de espessura tal que tornaria sua execução não somente difícil como de custo excessivamente elevado e de peso exagerado. Pelas razões expostas, entre outras, a pressão acima pode ser considerada como limite máximo para este tipo de gerador.

Caldeiras aquotubulares usando somente coletores e tubos de pequeno diâmetro são construídas com placas de menor espessura. Portanto, são mais aptas para vaporizar sob maior pressão, pelo motivo de que, para um maior valor deste parâmetro, ao diminuir o diâmetro do recipiente, a espessura do metal capaz de suportá-la diminui proporcionalmente.

Conforme o grau de superaquecimento do vapor que for necessário obter nos geradores aquotubulares, o superaquecimento é instalado em qualquer lugar no percurso dos gases, desde a fornalha até os canais de fumaça, com o que poderão ser atingidas temperaturas maiores que no caso da caldeira flamotubular.

Na caldeira flamotubular, os superaquecedores devem ser colocados no interior dos tubos, o que reduz a secção de passagem dos gases, dificultando também a limpeza, ou na caixa de fumaça, onde a temperatura não é suficientemente elevada. Tais condições tornam este tipo de caldeira apto que a do tipo aquotubular para a produção de vapor superaquecido.

5.6.4 Tempo necessário para atingir a pressão de operação

Como os geradores aquotubulares contêm uma pequena quantidade de água por m² de superfície de aquecimento e, além disso, a dilatação das diferentes partes pode efetuar-se independentemente do resto da caldeira, é fácil compreender que atingirão a pressão de operação em menor período de tempo que as tubulares. Neste tipo o período necessário para que a dilatação se realize de forma lenta e gradual pode exceder 24 horas em caldeiras de grandes dimensões. No entanto, para o tipo aquotubular oscila ao redor de 4 horas, ou menos ainda se necessário sem maior perigo para a caldeira.

Caldeiras cilíndricas flamotubulares, devido a sua estrutura e construção rígida, resultam altamente sensíveis às mudanças bruscas de temperatura, as quais ocasionam deformações permanentes, que podem afetar a sua resistência obrigando a reparos difíceis e onerosos.

O equilíbrio térmico das diferentes partes de uma caldeira aquotubular estabelece-se rapidamente como consequência da sua menor massa e da atívisima circulação de água no seu interior.

5.6.5 Qualidade da água de alimentação

Uma das vantagens da caldeira flamotubular, quando comparada com uma aquotubular, consiste na possibilidade de alimentá-las com água natural. Nesta, é condição fundamental o emprego de água tratada, para evitar não somente a formação de incrustações sobre a superfície de aquecimento como a produção de espuma e ebulição, conjuntamente com vapor. Em todos os casos, é conveniente o uso de água tratada. Este assunto será melhor discutido no próximo capítulo.

5.6.6 Eficiência térmica

A definição de eficiência em equipamentos térmicos é muito importante, porém faltam normas nacionais. Na ausência delas, normalmente utilizam-se as normas DIN (alemã) ou ASME (americana), as quais usam parâmetros diferentes. Um mesmo equipamento poderia alcançar eficiência de 93% pelo sistema DIN contra 84% no ASME.

Atualmente, a eficiência térmica ou o rendimento total que pode ser obtido na caldeira do tipo aquotubular supera o correspondente à caldeira do tipo flamotubular. Na primeira tem-se obtido eficiência (usando a norma ASME) de 80% a 85% ou maiores em caldeiras com superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar; na última é impossível superar valores de 75% a 78% nas melhores condições de limpeza.

A maior eficiência dos geradores aquotubulares deve-se à disposição mais racional da superfície de aquecimento, que favorece a transmissão do calor desenvolvido na fornalha e, especialmente, à adoção de superaquecedores de vapor, aquecedores e economizadores já mencionados. Estes equipamentos permitem recuperar grande parte do calor residual dos gases quentes da combustão, que passam pela chaminé, diminuindo a temperatura final destes.

5.6.7 Condução e limpeza

Devida à quantidade de água que contém as caldeiras do tipo aquotubular e a sua elevada evaporação específica, deverá ser mantida uma vigilância constante e cuidadosa do nível de água, especialmente nos casos em que sejam necessários elevados graus de combustão.

Caldeiras do tipo flamotubular requerem menor atenção pelo fato de possuírem grande massa de água e menor vaporização específica, podendo a renovação máxima ocorrer de uma vez a cada hora. Nas caldeiras do tipo aquotubular leve a totalidade da água da caldeira pode vaporizar de 8 a 10 vezes por hora em condições de carga máxima. Pelo exposto, deduz-se que as variações de nível são rapidíssimas, motivo que tem levado os fabricantes à adoção de mecanismos que regulam automaticamente o nível de água no interior do gerador para evitar falhas humanas que poderiam levar à perda do gerador do vapor.

Outra vantagem que apresenta o gerador de vapor do tipo tubular: devido à grande massa de água e ao considerável volume da câmara de vapor, acumula considerável energia potencial, o que o torna apto a satisfazer demandas elevadas de vapor das máquinas às quais servem sem sofrer grandes quedas de pressão.

Como as caldeiras do tipo aquotubular contêm menor quantidade de água e a câmara de vapor é mais reduzida, resultam susceptíveis às variações de consumo de vapor. Nestas caldeiras, para evitar a queda rápida da pressão, torna-se necessário modificar imediatamente o grau de combustão, o que, conseqüentemente, leva a uma maior e constante atenção na condução do processo de combustão.

A limpeza interna das caldeiras flamotubulares apresenta menos dificuldades que a das aquotubulares por apresentarem em suas partes maior acessibilidade. Nas caldeiras do tipo aquotubular a quase totalidade de sua superfície de aquecimento está constituída de tubos de grande comprimento e pequeno diâmetro, às vezes curvados, o que torna mais difícil a limpeza interna e, obviamente, demanda mais tempo para efetua-la.

Concluindo, pode-se estabelecer que as caldeiras do tipo aquotubular necessitam para sua condução e manutenção de pessoal profissionalmente mais experiente que para os mesmos serviços com caldeiras do tipo tubular.

5.6.8 Vida útil

Define-se como vida útil de um gerador a quantidade de horas de fogo que pode suportar em condições normais de funcionamento; isto é, vaporizando a pressão máxima de trabalho admissível para a qual tenha sido projetada

Deve-se considerar que quando por motivo de segurança decorrente da falta de conservação adequada ou por desgaste normal da caldeira tenha sido reduzida a pressão de

descarga das válvulas de segurança, considerar-se-á como vida útil o tempo anterior a esta operação, e não o tempo total, em que se computa também a nova utilização da caldeira com a pressão reduzida.

Como nas caldeiras do tipo aquotubular os tubos vaporizadores e superaquecedores constituem a parte mais exposta, a durabilidade destas é uma função da vida destes elementos. A experiência tem demonstrado que este tipo de caldeira apresenta menor resistência que as do tipo flamatubular, o que é perfeitamente justificável por serem mais severas as condições de operação.

A troca de tubos em uma caldeira aquotubular constitui uma operação relativamente rápida e fácil. Na caldeira tubular, após determinado número de anos de trabalho, além do problema da inutilização de tubos, é comum ocorrerem problemas como deformação das fornalhas, corrosão ou desgaste, reduzindo as dimensões úteis de partes metálicas, fissuras, fendas e outras descontinuidades, desnivelamentos e dilatações ou contrações térmicas reversíveis ou irreversíveis.

A vida útil de uma caldeira depende, fundamentalmente, do método de trabalho que tenha sido realizado, do sistema de vaporização (regime constante ou variável), da qualidade da água de alimentação, da frequência das limpezas externas e internas etc., motivo pelo qual não é possível determinar sem cometer erros consideráveis o tempo médio de vida para cada caldeira. Dependerá, além dos cuidados mencionados, da experiência e da dedicação do pessoal a cargo destas encarregado.

5.7 Caldeiras de condensação

A implementação de sistemas de recuperação de energia deu origem ao aparecimento, no mercado, das designadas *caldeiras de condensação*.

Essas caldeiras, de eficiência térmica muito mais elevada do que as convencionais, estão direcionadas para potências relativamente moderadas, até 900 kW ou 775 000 kcal/h e para a produção de água quente, até 95°C.

As caldeiras de condensação, para além do tubular normal, dispõem de um permutador (gases/água) antes da chaminé, onde se realiza o arrefecimento dos gases (acompanhado da condensação dos seus vapores) e o aquecimento da água, no seu trajeto de retorno à caldeira. A evacuação dos condensados dos vapores, que se formam ao atravessar o permutador, é efetuada por um dreno inferior, seguindo os gases para a respectiva chaminé.

5.8 Equipamentos recuperadores de calor

5.8.1 Superaquecedores e reaquecedores

Em algumas situações, é de interesse que o vapor seja superaquecido ou reaquecido; por exemplo, após passar por uma expansão em uma turbina. A principal razão para que isso seja feito é que se deve manter a qualidade do vapor acima de certos limites, evitando a erosão e danos nas pás dos estágios finais das turbinas a vapor.

Para superaquecer o vapor, acumulando na massa de vapor uma maior energia térmica, empregam-se os aparelhos denominados *superaquecedores*, que normalmente, aproveitam os gases da combustão ainda na câmara de combustão ou no início do feixe de tubos para aquecer o vapor saturado, transformando-o em vapor superaquecido, na mesma condição de pressão. Os superaquecedores são construídos de tubos de aço em forma de serpentina, cujo diâmetro varia de acordo com a capacidade da caldeira, podendo ser lisos ou aletados.

Quando instalados dentro das caldeiras, estão localizados atrás do último feixe de tubos, entre dois feixes de tubos, sobre os feixes de tubo ou, ainda, sobre a fornalha (Fig. 5.8). A caldeira pode apresentar o superaquecedor em separado (Fig. 5.9). Neste caso, ele dependerá de uma fonte de calor para o aquecimento. Normalmente, é instalada outra fornalha.

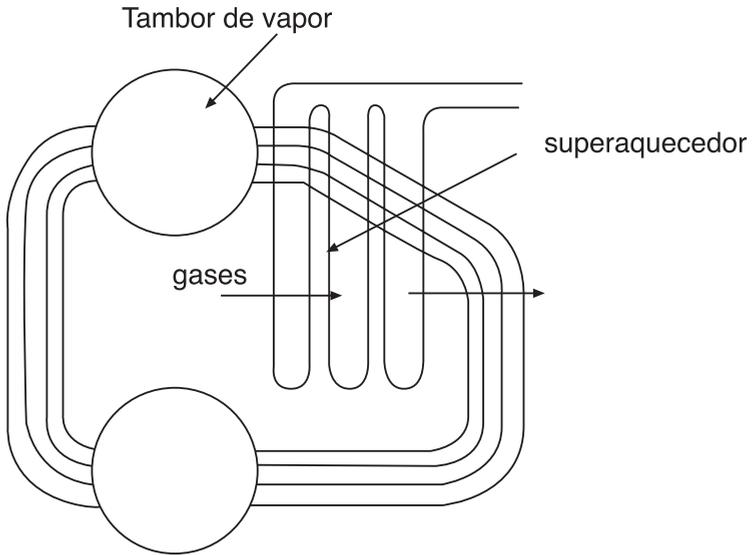


Figura 5.8 - Superaquecedor Integral

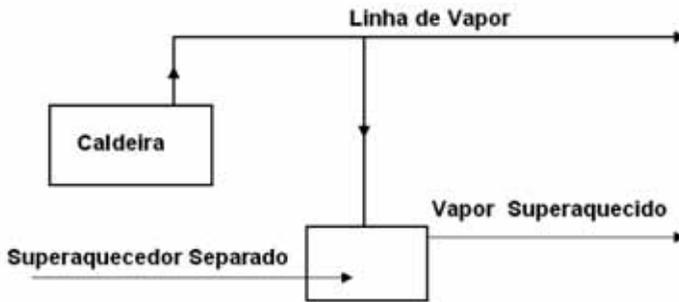


Figura 5.9 - Superaquecedor instalado fora da caldeira

5.8.2 Economizadores

Como o próprio nome indica, a função do economizador é aproveitar o calor residual dos gases de combustão que acabaram de deixar a fornalha. Esses gases passam por um trocador de calor e aumentam a temperatura da água de alimentação da caldeira. Geralmente, são usados trocadores de calor do tipo tubos encurvados e, mais raramente, trocadores de placas.

5.8.3 Pré-aquecedores

Os pré-aquecedores, normalmente, são a última etapa de troca de calor dos gases de combustão. Esse trocador é usado para aumentar a temperatura do ar que será usado na queima do combustível.

Como a troca de calor se dá entre dois gases, o ar e os de combustão, é necessário que os trocadores possuam grandes superfícies de troca de calor. Por este motivo, são equipamentos volumosos. Existem concepções compactas, do tipo rotativo, mostrada na Figura 5.10.

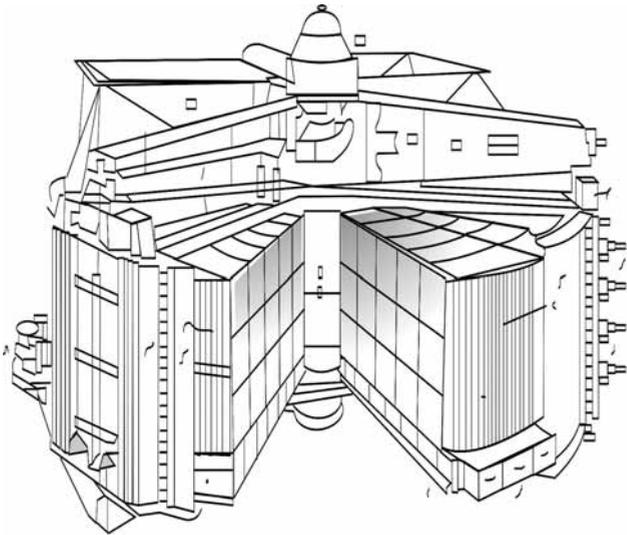


Figura 5.10 - Corte de um pré-aquecedor rotativo

6 Alimentação e Tratamento de Água para Caldeiras

A alimentação de água, para repor a água correspondente ao vapor produzido, e o tratamento, para manter a qualidade desta água, são duas das mais importantes operações necessárias ao perfeito funcionamento de um gerador de vapor dentro dos limites de segurança e sem perda de eficiência.

6.1 Sistemas de abastecimento de água

A cada quilograma de vapor extraído da caldeira deve corresponder equivalente quantidade de água injetada. Não se verificando a reposição, o nível de água no interior da caldeira começa a baixar. Enquanto as superfícies metálicas expostas ao contato dos gases quentes estiverem banhadas pela água, nenhum dano ocorre ao equipamento. No momento que o nível ultrapassar o limite mínimo ao estabelecido, compromete-se a segurança da unidade. Criam-se condições de ruptura das paredes metálicas ou, mesmo, de explosões, devido ao superaquecimento da placa metálica. Por essa razão, cabe ao operador, auxiliado pela automação do processo de alimentação, vigiar permanentemente o nível exibido pelo visor transparente existente na caldeira.

A introdução da água nos geradores de vapor se faz com os aparelhos de alimentação. Sob o ponto de vista termodinâmico, o aparelho de alimentação realiza o trabalho representado pelo deslocamento de uma massa de água associado a uma pressão capaz de vencer as resistências oferecidas pelo circuito. Pode-se assim afirmar que o sistema de abastecimento de água é responsável tanto pelo suprimento da água como pela pressurização do sistema. A Figura 6.1 apresenta um esquema típico de instalação de alimentação de água, com bomba centrífuga, controlada automaticamente por uma válvula.

A alimentação pode ser feita por duas opções de local: no tubo de lama ou no tubulão. O critério para a decisão está na temperatura em que esta água está disponível. Ou seja, se estiver numa temperatura “fria”, é indicado o abastecimento pelo tubo de lama; se estiver “quente” ou “quase quente”, a alimentação pode ser pelo tubulão de vapor.

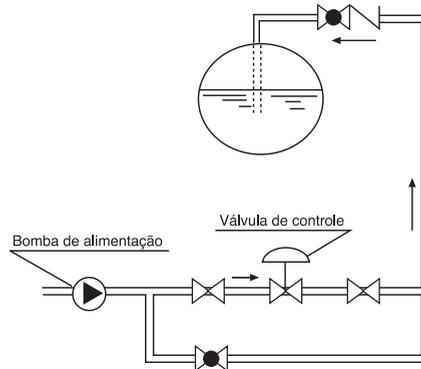


Figura 6.1 - Esquema de uma linha de alimentação de água de caldeira

6.1.1 Injetores

São equipamentos para alimentação de água usados em pequenas caldeiras de comando manual. Também, foram empregados nas antigas locomotivas a vapor. Seu princípio, simples, baseia-se no uso do próprio vapor de caldeira ou de ar comprimido, que é injetado dentro do aparelho, onde existem seções cônicas divergentes e, válvulas de retenção, de controle e de sobrecarga, conforme ilustrado na Figura 6.2.

Quando o ar ou vapor passa pelas seções cônicas divergentes, forma-se uma depressão, que faz com que a válvula de admissão seja aberta e arrasta por sucção a água de um reservatório para o interior da caldeira. Caso a água entre em excesso, ela pode sair através de uma válvula de sobrecarga.

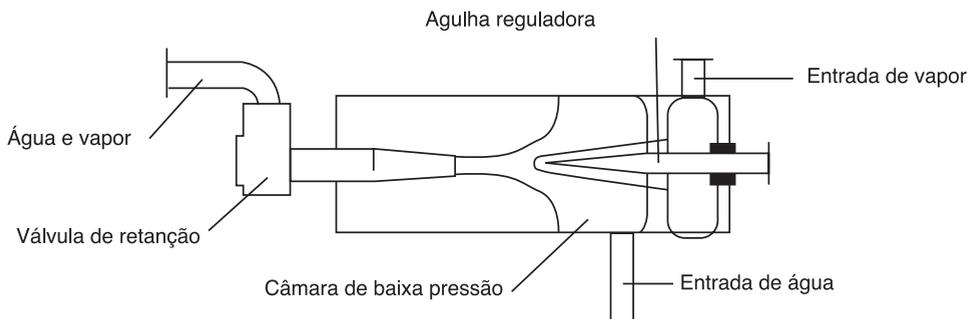


Figura 6.2 - Injetor de água

6.1.2 Bombas centrífugas

São os equipamentos de alimentação de água que têm dado os melhores resultados, pela simplicidade de seus componentes, facilidade de manutenção e grande vazão que oferecem, atingindo até 500.000 litros de água por hora, e por operar em regime contínuo, ao contrário das bombas alternativas, em que a alimentação se processa em golpes contínuos.

Seu funcionamento consiste em um disco com um jogo de palhetas que giram em alta velocidade e fazem a sucção da água. Cada disco forma um estágio, cuja quantidade pode variar de acordo com a capacidade da bomba. Nas caldeiras de baixa pressão empregam-se bombas com apenas um estágio e nas de alta pressão são usados multiestágios.

As bombas centrífugas são passíveis de serem acionadas por motores elétricos ou por turbinas a vapor. Estas últimas são aplicáveis apenas em geradores de maiores capacidades e pressões. Normalmente, possuem carcaça cilíndrica e bipartida.

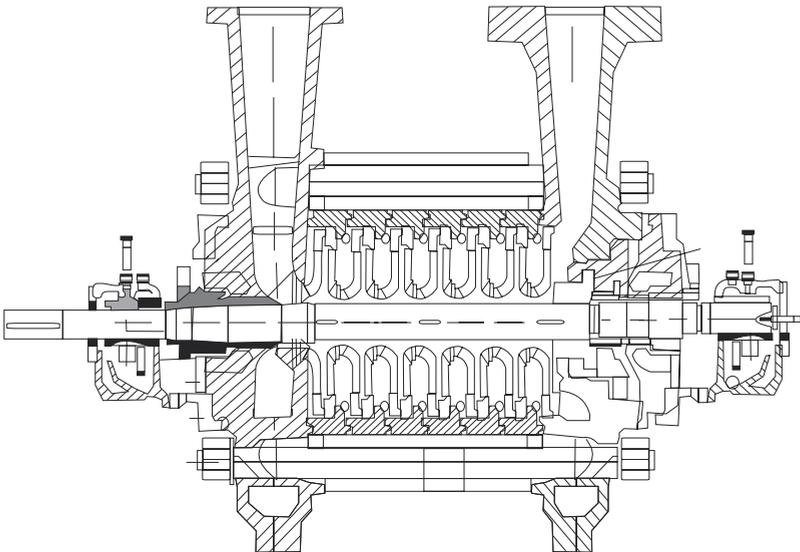


Figura 6.3 - Bomba centrífuga de alta pressão para caldeiras
Fonte: Pêra (1990)

6.2 Sistemas de tratamentos de água

6.2.1 Água de alimentação das caldeiras

A água de alimentação de caldeiras provém de fontes naturais, como poços, lagos, córregos, rios e de outros mananciais que contêm reservas deste fluido. Conforme a sua procedência, essa água pode conter diferentes produtos dissolvidos ou em suspensão, em concentrações bem diversas.

O emprego direto da água "in natura" como água de alimentação de caldeiras implica um processo de evaporação da fase líquida, com conseqüentes concentrações dos produtos minerais dissolvidos. Outros produtos, entretanto, também são liberados, como gases dissolvidos existentes na fonte fornecedora ou, mesmo, resultante da decomposição de matérias orgânicas igualmente presentes.

Os resíduos, após a evaporação da fase líquida, formam depósitos sobre as superfícies metálicas das caldeiras, com aderências de diferentes tipos, de conformidade com a natureza do material acumulado. Certos produtos depositados permanecem na forma de um lodo de fácil remoção e outros se incorporam à própria parte metálica, na forma de resíduos resistentes, de remoção mais difícil, constituindo um depósito denominado pelos caldeiros de *incrustações*.

Como esses depósitos incrustantes são fracos condutores de calor, seu acúmulo sobre as superfícies metálicas tende a criar maiores resistências ao escoamento do calor, contribuindo para uma sensível diminuição do coeficiente de condutividade entre os gases quentes e a água situada no interior da tubulação. Evidentemente, diante de uma condição de trabalho que prejudica a troca de calor entre os fluidos do processo, a caldeira passa a produzir menor quantidade de vapor e a apresentar uma diminuição na sua eficiência térmica.

6.2.2 Análise da água

A unidade mais adotada na engenharia para exprimir a concentração das substâncias em solução nas águas naturais é o ppm, partes por milhão. Existem outras unidades, mais comuns nas análises inglesas, como "grãos americanos por galão, gpg". Entre as diferentes unidades há as seguintes equivalências:

$$1 \text{ gpg} = 17,1 \text{ ppm}$$

$$1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/l} = 1 \text{ g/m}^3$$

$$1 \text{ ppm} = 0,0583 \text{ gpg}$$

As análises são sempre feitas com referência ao volume de água, e não ao peso. Assume-se o peso de 1 kg por litro de água, sem levar em conta a correção pela temperatura.

Toda água de alimentação deve ser conhecida e controlada. Com base no fato de já se conhecerem as impurezas normais das águas naturais, foram formulados métodos simplificados suficientemente satisfatórios para assegurar um controle rotineiro.

O método consiste na determinação dos seguintes valores: dureza, alcalinidade, cloretos, fosfatos e pH (acidez). Certas águas obrigam a determinação de outros dados, como: sólidos totais, resíduos calcinado, matéria orgânica, concentração de O₂ livre e sílica.

- *Dureza* - Exprime a concentração dos sais de cálcio, seja na forma de carbonato, sulfato silicato ou cloreto.
- *Alcalinidade* - Exprime a presença de íons dos sais de bicarbonato, carbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos, etc., ou seja, todos os que contribuem para a alcalinidade da água. Destes, os mais expressivos são os carbonatos e hidróxidos.
- *Cloretos* - São geralmente muito solúveis, sejam de cálcio, magnésio, sódio, ferro e outros. Sua determinação se faz com solução de nitrato de prata N10 padrão, empregando como indicador o cromato de potássio. Estes sais, por serem altamente solúveis, permitem, em primeira aproximação, estabelecer a porcentagem de descarga da caldeira.
- *Fosfatos* - São auxiliares valiosos no tratamento de água. Geralmente, não comparecem nas águas naturais. Sua determinação se processa com reagente de molibdato de amônio. A concentração é analisada por teste colorimétrico comparativo com escala padrão. A intensidade da cor é proporcional à concentração do fosfato. Usando-se uma escala padrão para comparação, tem-se a indicação da concentração de fosfatos.
- *pH* - Indica a acidez ou alcalinidade das águas. As águas naturais são, em geral ligeiramente ácidas: 6,3 - 6,5 pH. O pH é determinado por escala comparativa de indicadores padrões ou por meio de phmetros eletrônicos.

- *Matéria orgânica* - Podem comparecer nas águas na forma coloidal ou de algas microscópicas, respondendo por sérios problemas de corrosões nos superaquecedores e também nas caldeiras. Sua determinação se faz pelo processo do permanganato.
- *Gases dissolvidos* - As águas naturais contêm sempre gases dissolvidos. O CO₂ se apresenta com concentração até 50 ppm, porém facilmente eliminável por aquecimento. A solubilidade do oxigênio chega a ser até 5,7 ml/l à 25°C. O oxigênio é extremamente agressivo, atacando o metal da caldeira. O aumento da temperatura da água acentua a agressividade deste gás. Sua determinação, para caldeiras de pressões mais elevadas, acima de 21 kg/cm², é obrigatória. O método para a determinação do oxigênio exige cuidados especiais. Deve-se a Winkler, baseado na rápida ação oxidante do elemento em soluções de hidróxido manganoso Mn(OH)₂.
- *Silica* - É responsável pelas incrustações mais difíceis de serem removidas das superfícies metálicas. Sua determinação se faz por processo quantitativo.
- *Sólidos totais* - É a soma dos sólidos em suspensão e dos sólidos dissolvidos. Os sólidos totais são uma medida da possibilidade de formação de espuma, arraste de sílica volátil e formação de depósitos. Supondo que o tratamento d'água esteja obtendo o máximo de eficiência possível, é necessário purgar a caldeira para reduzir sua concentração. Esta purga é realizada pela extração de superfície, que é uma purga contínua, e, quando necessário, pela extração de fundo, que é uma purga intermitente, limitando assim a concentração de sólidos totais admissíveis na água de caldeira, cujo teor tolerável é inversamente proporcional à pressão de operação.

6.2.3 Objetivos gerais do tratamento da água

- realizar a prevenção em alta escala de depósitos de sólidos e efluentes que coíbem a taxa de transferência de calor, que pode levar a um superaquecimento do metal e, conseqüentemente, a reparos de alto custo e interrupções de operação, além de operação insegura;
- eliminar gases corrosivos na água de alimentação ou da caldeira;
- realizar a prevenção do craqueamento inter cristalino e da fragilização caustica do metal; e
- realizar a prevenção do transporte de materiais estranhos e formação de espuma.

O cumprimento destes objetivos geralmente requer o tratamento anterior e posterior da introdução da água na caldeira. A seleção dos processos de pré-tratamento depen-

de das fontes de água, das características químicas, das quantidades necessárias de água de reposição, das práticas de operação da central, etc.

Os métodos de tratamento anterior incluem filtragem, amaciamento, desmineralização, desaeração e pré-aquecimento.

O tratamento posterior envolve a adição de produtos químicos à água da caldeira. É necessário para compensar as variações presentes no pré-tratamento e no sistema pré-caldeira para assegurar a proteção desta. Devido às diversas variáveis envolvidas, a análise de somente uma delas não deve ser o único parâmetro para garantir a operação da caldeira. Os métodos caseiros de tratamento de água devem também ser evitados. Sondagens periódicas devem ser intensificadas para a análise da água não tratada, da água da caldeira e do condensado.

As superfícies internas, ou molhadas, do vaso de pressão devem ser inspecionadas com frequência suficiente para determinar a presença de contaminação, acúmulo de matéria estranha, corrosão e/ou erosão. Caso um destes seja detectado, deve ser consultado um especialista ou uma empresa de tratamento de água para aconselhar uma ação corretiva.

É recomendável existir um medidor instalado na linha de água de reposição para determinar precisamente a quantidade de água não tratada a ser admitida na caldeira. Este procedimento auxiliará o programa de tratamento de água a manter as condições apropriadas.

Basicamente, apresenta-se em dois métodos sempre associados. O primeiro, denominado *Tratamento Externo*, proporciona o melhoramento da qualidade da água antes de sua introdução no gerador de vapor. O segundo, denominado *Tratamento Interno*, realiza as reações químicas de tratamento no interior da própria caldeira.

6.2.4 Tratamentos externos

■ Clarificação

O primeiro passo no tratamento da água é sua clarificação, a fim de remover todas as partículas sólidas existentes em suspensão responsáveis pela sua turbidez. O método tradicional de simples filtração só obtém resultado quando a água procede de poços artesianos profundos, os quais, às vezes, já dispõem de uma água límpida, embora fortemente carregada de sais dissolvidos. Nessa hipótese, a aplicação de um filtro de areia

aberto, com a remoção das impurezas por gravidade ou uma variante de filtro autolavável, também aberto, atende às necessidades do processo. Na ausência de espaço para se instalar um filtro deste tipo, recorre-se a um filtro de camadas de areia e antracito, fechado e compacto, que promove a circulação da água sob pressão até no máximo de 10 m. c.a. (Fig. 6.4). Quando a pressão interna do vaso do filtro acusa valores superiores à pressão atrás indicada, promove-se uma inversão do fluxo da água que passa a circular no sentido ascendente, arrastando para o esgoto todo o material acumulado sobre a camada superior de areia. Esta operação se prolonga até o visor existente no circuito acusar a passagem de água límpida, com duração aproximada de 5 a 10 minutos.

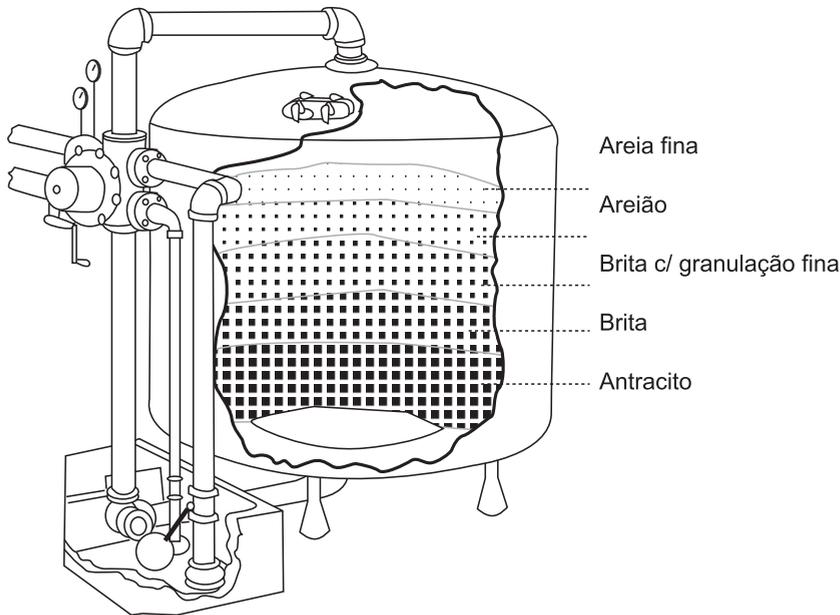


Figura 6.4 - Filtro de camadas de areia e antracito

Fonte: Pêra (1990)

Naturalmente, durante esta limpeza o suprimento de água fica interrompido, razão pela qual é de boa norma instalar dois aparelhos em paralelo. Enquanto um deles atende à operação de limpeza, o segundo continua suprindo água ao processo. A periodicidade da operação limpeza depende da qualidade da água. Na maioria dos casos, não ultrapassa 24 horas, com um mínimo de 12 horas. Todavia, a turbidez da água, igualmente, deve-se à presença de matérias coloidais dificilmente retidas nos filtros anteriores. Esta ocorrência é comum nos mananciais de superfícies que agregam águas correntes com

todos os tipos de rejeitos por onde passam, humanos, vegetais e minerais.

Difícilmente se encontra um córrego, rio ou lago que disponham de água límpida, sendo forçoso o acréscimo de um pré-tratamento antes da filtração, denominado *clarificação*. Os aparelhos clarificadores recebem a água bruta tal qual procedem das fontes de suprimento, juntamente com agentes coaguladores, que promovem a formação de flocos gelatinosos dotados de grande capacidade de absorção das impurezas existentes no fluido.

Os agentes coagulantes minerais mais divulgados são compostos de ferro e de alumínio, estes últimos de maior aplicação. O hidróxido de alumínio formado no aparelho, com aspecto de flocos gelatinosos, vai paulatinamente decantando, arrastando para o fundo do aparelho toda a turbidez da água.

Os aparelhos destinados a formar os flocos são denominados *floculadores*. Os destinados a decantar são os *decantadores*. As duas funções podem ser verificadas num único aparelho, denominado *clarificador*. A Figura 6.5 mostra um esquema de um decantador estático tipo cilíndrico cônico.

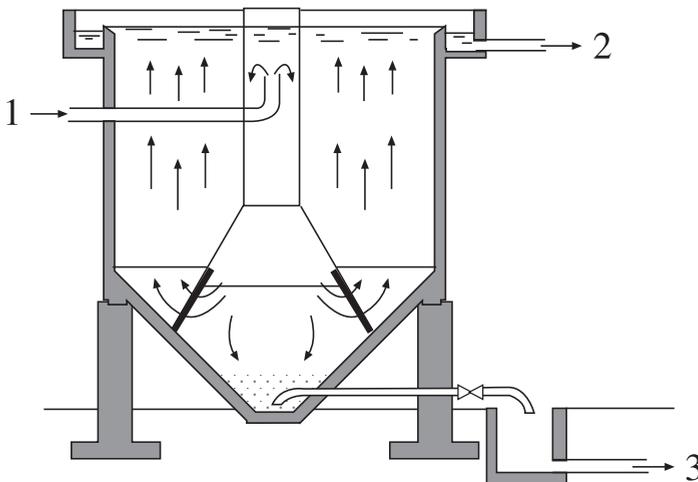


Figura. 6.5 - Decantador cilíndrico cônico

Fonte: Pêra (1990)

A água límpida produzida a seguir deve ser submetida a outros tratamentos para eliminar as impurezas dissolvidas. Serão parâmetros determinantes na decisão do proces-

so de tratamento a ser adotado: a qualidade da água, a pressão da caldeira e a pureza do vapor.

Determinadas águas, uma vez isentas de turbidez, podem ser introduzidas diretamente no interior das unidades geradoras de vapor de baixa pressão e ali serem submetidas ao chamado *tratamento interno*, a ser descrito páginas adiante. Caldeiras de maior responsabilidades, principalmente aquelas que se destinam a suprir vapor para centrais térmicas, exigem águas absolutamente isentas de impurezas.

Na segunda etapa dos tratamentos externos praticados pela tecnologia encontram-se aqueles que promovem apenas o abrandamento da água, ou seja, que eliminam a sua dureza e outros projetados para fornecer uma água totalmente desmineralizada. Em ambos, em seguida, acrescenta-se a desgaseificação ou a desaeração.

■ Abrandamento

Existem na literatura diversos métodos para se obter o abrandamento da água. O mais difundido atualmente é o por troca de íons, que se baseia na propriedade de certas areias naturais, quando imersas em água, provocarem um intercâmbio de íons.

Tal processo consiste em passar a água dura através de uma coluna de resina aniônica à base de sódio. O sódio presente na resina substitui o cálcio e o magnésio da água, num processo contínuo até o seu exaurimento, momento a partir do qual se torna forçosa a regeneração. Neste estágio interrompe-se a passagem da água a ser tratada, substituindo-a por uma solução de cloreto de sódio, a qual recompõe o cátion consumido e remove o cálcio e o magnésio do aparelho diretamente para o esgoto. Feita a regeneração, volta à operação do ciclo de tratamento. A Figura 6.6(a) exhibe um aparelho abrandador de um estágio, com tanque de salmoura para regeneração e todas as tubulações de operação. A Figura 6.6(b) representa o corte em perspectiva de um abrandador de leito misto.

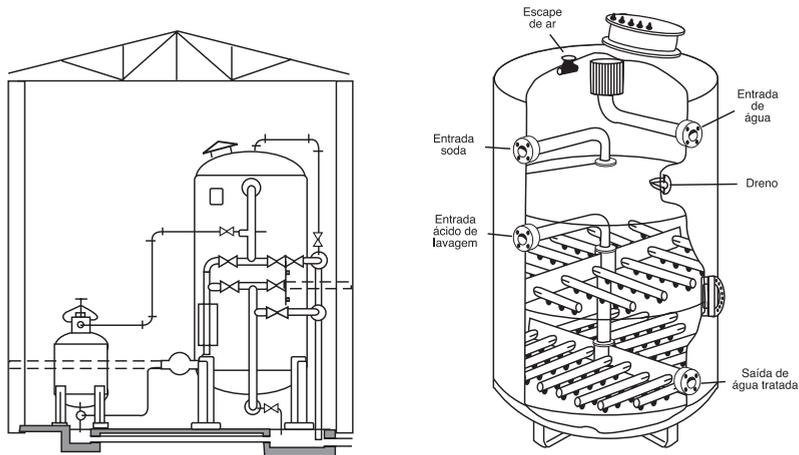


Figura. 6.6 (a) - Instalação de abrandador de um Estágio; (b) - Corte em perspectiva de um permutador abrandador de leito misto

Fonte: Pera (1990)

■ Desmineralização

Efetuada sobre uma série de trocadores de íons, é o tratamento escolhido para a alimentação das caldeiras com pressões acima de 40 kgf/cm^2 , especialmente quando estas comportam superaquecedores ou alimentam turbinas, caso das usinas térmicas para geração de potência. Uma unidade para suprimento de água desmineralizada contém os aparelhos de troca aniônicos e catiônicos, conforme a exigência da qualidade da água, e se complementa com outros aparelhos, como preparadores das soluções regenerativas, bombas dosadoras e aparelhos registradores.

■ Desaeração

Tem a finalidade de eliminar todos os gases ainda dissolvidos na fase líquida para a atmosfera, como oxigênio, gás carbônico e sulfídrico. A eliminação dos gases normalmente é executada por aparelhagem específica, denominada *degaseador*, ou *degaseificador*. Todavia, unidades que operam com baixas pressões podem dispensar o acréscimo da aparelhagem adotando métodos químicos para atenuar o efeito corrosivo, sobretudo o oxigênio.

Os produtos mais difundidos neste tipo de tratamento são o sulfito de sódio e a hidrazina. A hidrazina simples ou catalizada vem sendo mais utilizada para neutralizar a corrosão do oxigênio, porquanto ela seqüestra este gás dissolvido na água.

■ Equipamentos desaeradores

O desaerador a pulverização, como mostra a Figura 6.7, dispersa a água em finas gotas através de pulverizadores na câmara de vapor do aparelho, proporcionando aumento da superfície de contato das fases.

O degaseador de cascata, também conhecido como de *bandejas*, opera em contracorrente, despejando a água a partir de um distribuidor superior, na forma de múltiplas cascatas, através do qual o vapor flui em sentido contrário. A fase líquida se aquece ao longo do percurso até se acumular no vaso de reserva. Parte do vapor se condensa e parte escapa pelo escape na atmosfera, arrastando consigo os gases incondensáveis.

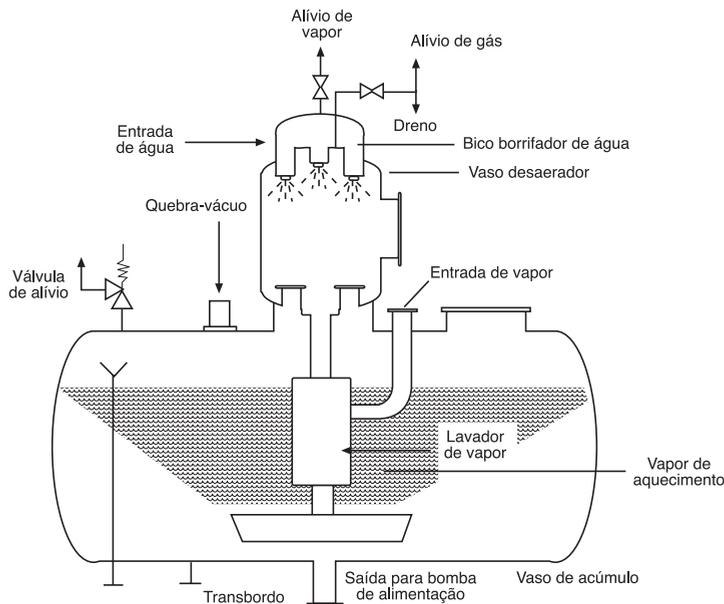


Figura 6.7 - Esquema de um degaseador a pulverização

Uma variação mais moderna deste tipo aplica bandejas perfuradas, de forma a criar uma série de jatos cilíndricos de água em queda vertical, aumentando a superfície de contato das fases, conforme esquema da Figura 6.8.

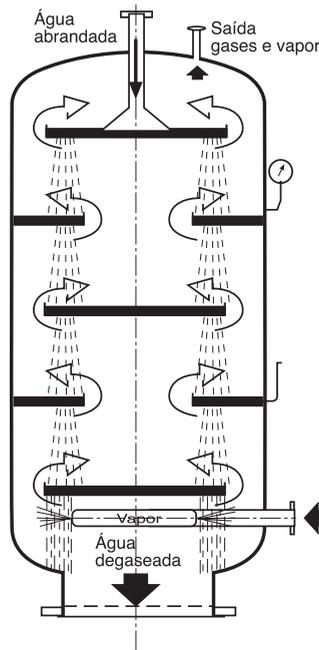


Figura 6.8 - Degaseador de bandejas perfuradas
Fonte: Pêra (1990)

Os gases incondensáveis são arrastados pelas bolhas de vapor em excesso para a coluna do aparelho, que dispõe de uma distribuição da água de ingresso na forma de cascatas. Na maioria das instalações de desaeramento, o aparelho opera com uma pressão interna ligeiramente superior à pressão atmosférica, de conformidade com a temperatura desejada na água desaerada.

■ Remoção da sílica

Como já foi observado, a sílica está presente na água como ácido silicíclico e silicatos solúveis. Forma incrustações de difícil remoção, que podem ser retirados pelo tratamento com óxidos por troca iônica.

6.2.5 Tratamento interno

Aplica-se em água de baixa dureza, não turvas, adicionando-se produtos químicos, que reagem no interior da caldeira. Existem várias composições no mercado, cujas doses são prescritas pelos fabricantes em função das impurezas encontradas pela análise da água. O produto básico destas composições, porém, é o trifosfato de sódio.

É o método mais econômico, que consiste em adicionar uma solução dos sais de tratamento no próprio tanque de alimentação de água ou no tubo de injeção no interior da caldeira, mediante um dosador contínuo. As reações do fosfato no interior da caldeira precipitam os sais de cálcio, numa forma não aderente à superfície metálica e tornam altamente solúveis os sais que davam dureza à água. O precipitado formado pelas reações, sob a forma de lodo, deposita-se nas partes inferiores da caldeira, de onde são eliminados por meio de descargas intermitentes.

6.2.6 Formação de espuma e arraste

O arraste consiste de diminutas gotículas de água, que são carregadas pelo vapor no momento que este se desprende da superfície da água. Em condições normais de operação, o arraste de água é uma possibilidade remota, pois os internos do tubulão superior são projetados para evitar que isto ocorra. Entretanto, pode ocorrer este tipo de arraste se houver:

- danos nos aparelhos separadores de vapor;
- nível alto no tubulão;
- variação brusca de carga; ou
- presença de espuma no tubulão superior.

A formação de espuma deve-se à concentração de produtos químicos, provocando redução de tensão superficial da película de água, que envolve as bolhas de vapor em geração. As causas da formação espuma são:

- excessiva concentração de sólidos na água;
- excessiva alcalinidade cáustica; ou
- matéria orgânica em suspensão na água, como óleo e graxas.

Assim, os produtos químicos são lançados no espaço de vapor e carregados por ele. A intensidade desta espuma depende da natureza dos compostos químicos na água da caldeira. O problema de arraste provoca a formação de depósitos no superaquecedor, nas pás das turbinas e no sistema de condensado, além de problemas de corrosão e erosão, nas caldeiras aquotubulares.

Outro contaminante indesejável é o óleo ou graxa presente na água de caldeiras, os quais são grandes formadores de espuma. Formam também uma película isolante sobre a superfície interna dos tubos da caldeira, provocando superaquecimento. Dependendo da temperatura, podem ser carbonizados, resultando uma deposição de carbono na caldeira.

Apesar do tratamento mais rigoroso que se possa adotar, é impossível eliminar da água todos os sais em solução. Excetua-se o método da destilação. A caldeira com a água que produz vapor, portanto, vai acumulando e concentrando os sais que ingressam com a água. A concentração deve ser mantida até o limite de solubilidade, a partir do qual há precipitações que concorrem para a incrustação, o arraste de partículas sólidas pelo vapor e a formação de espuma. É a descarga da caldeira que mantém a concentração destes sais dentro dos limites convenientes, além de arrastar o lodo que se acumula nas partes inferiores da caldeira.

7 Medição e Controle

Atualmente, todas as caldeiras necessitam de algum tipo de instrumentação e controle automático capaz de possibilitar que suas variáveis de processo se mantenham dentro de determinados limites pré-programados para atender à demanda de vapor e operar com garantia de segurança.

7.1 Fundamentos

O conhecimento da teoria de controle possibilita uma melhor compreensão do funcionamento da instrumentação e do sistema de controle de processos.

7.1.1 Variáveis de processo

Um importante conceito é o das variáveis de processo: variáveis controladas, variáveis manipuladas e variáveis de operação ou "set-point":

- *Variáveis controladas* - Respondem pelas condições de operação do processo e devem ser mantidas em determinados níveis para o seu correto funcionamento. Por exemplo: nível da água da caldeira e pressão do vapor.
- *Variáveis manipuladas* - Atuam nas condições de operação do processo. Por exemplo: vazão de água de alimentação, que pode ser manipulada ligando ou desligando a bomba centrífuga.
- *Variáveis de operação ou "set-point"* - Determinam as condições que o processo deve operar.

7.1.2 Sistema de medição

Um instrumento de medição, normalmente, é composto por sensor, transdutor e transmissor. Os sensores, posicionados diretamente nos equipamentos que realizam o processo, captam as alterações nas grandezas físicas relacionadas à medida a ser efetuada, realizam a transdução e transmitem as informações, na forma de sinais (elétricos, pneumáticos, etc.) para o sistema de controle. Os instrumentos indicadores não transmitem sinais para o sistema de controle e são utilizados somente para leitura visual.

7.1.3 Controle automático

A função principal de um controle automático é receber sinais enviados pelos instrumentos (níveis das variáveis controladas), comparar com os valores de “set-point”, computar (executar algoritmo de controle) e enviar sinais de correção para os atuadores (variáveis manipuladas), corrigindo o processo para responder às perturbações sofridas. Assim, o controlador, ou regulador, automático realiza o fechamento das malhas de controle de uma variável controlada.

7.2 Sistemas de medição

7.2.1 Medição de nível

O nível de água em uma caldeira é um dos principais parâmetros que garante o seu correto funcionamento. Se as superfícies metálicas expostas ao contato dos gases quentes estiverem banhadas pela água, nenhum dano ocorre ao equipamento, mas se o nível ultrapassar o limite mínimo ao estabelecido, criam-se condições de ruptura das paredes metálicas ou, mesmo, de explosões, devido o superaquecimento da placa metálica, comprometendo a segurança da unidade.

Indicador de nível

É comumente usado em caldeiras para indicar o nível entre a água e o vapor. Compõem-se de um tubo de vidro, com seus extremos conectados a blocos metálicos e ligados ao tanque, geralmente mediante três válvulas, duas de bloqueio e uma de purga. Utiliza-se nesse instrumento o princípio dos vasos comunicantes.

- *Visores tubulares.* São dispositivos robustos próprios para pressão e temperatura. São comumente usado em caldeiras para indicar o nível entre a água e o vapor. Uma blindagem especial de vidro, com tela ou proteção de plástico, pode evitar danos e lesões causados pela eventual quebra do vidro, mostrado na Figura 7.1.

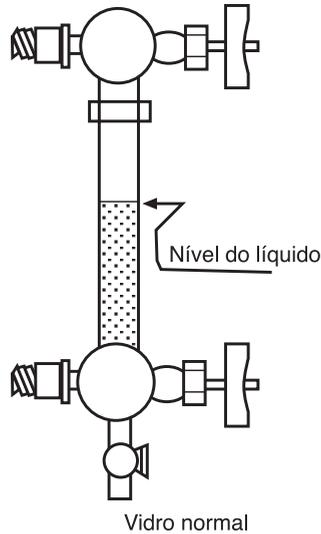


Figura 7.1 - Visor tubular

- *Visores "reflex"*: São usados em reservatórios a alta pressão e alta temperatura. Devem poder ser lidos a distância (Fig. 7.2). Possuem faces com ranhuras, cortadas em ângulo na superfície interna do vidro, que permitem que a luz passe através da parte coberta com o líquido e seja refletida por trás, na parte com vapor ou gás. A cor branca distinta representa o vapor; a preta, o líquido. Por isso, o visor de reflexão não pode ser utilizado para detectar níveis de interfaces. A cor do fluido não pode ser vista.

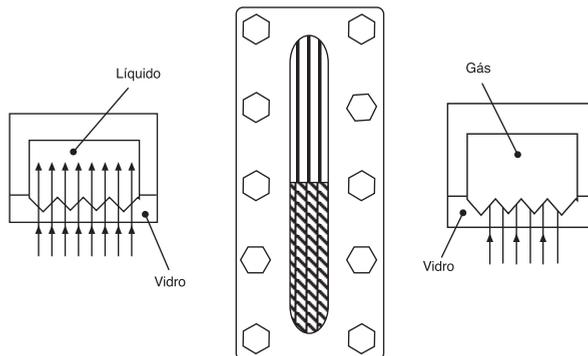


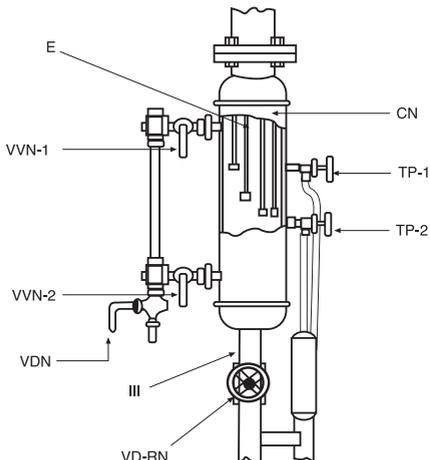
Figura 7.2. Visor de nível tipo reflex

- **Visores transparentes:** Revelam a cor ou a transparência do líquido e permitem visualizar interfaces (Fig. 7.3). O vidro na parte dianteira ou traseira da câmara permite uma visão nítida através dela. Um iluminador de plástico, com uma luz no centro, é montado em toda a parte posterior do visor, difundido à luz por todo o seu comprimento. Para serviço com vapor e a alta pressão, acima de 15 kgf/cm², pode-se manter uma blindagem de mica entre a câmara e o vidro, para evitar a erosão do vidro pelo vapor da água.

Sensores de nível

Os sensores são capazes de captar as variações de uma grandeza física e de produzir um sinal elétrico correspondente à variação da grandeza, além de transmitir este sinal para um regulador ou um sistema de controle automático.

- **Sensor de nível com eletrodos.** Aproveita a condutividade elétrica da água mediante três eletrodos de aço inoxidável e de tamanhos diferentes, correspondendo cada tamanho a um nível de água: o central, o máximo e o mínimo. Este dispositivo é montado na parte superior do tambor de vapor, e os eletrodos estão ligados a um relé de nível de água, que envia sinais do nível da água para o regulador automático, ou sistema de controle, que comanda a bomba de alimentação de água. A bomba entrará em funcionamento quando a água atingir a ponta de eletrodo central e deverá parar quando a água atingir o eletrodo de nível máximo (o menor eletrodo). Se o nível da água atingir a ponta do eletrodo maior, o relé, em alguns sistemas, poderá fazer funcionar um alarme, que dará ao operador a indicação do defeito (Fig. 7.).



E - Eletrodo

VVN-1 - Válvula do visor de nível superior

VDN - Válvula do dreno de nível

VVN-2 - Válvula do visor de nível inferior

VDRN - Válvula de dreno reguladora de nível

TP-1 - Torneiras de prova 1

CN - Coluna de nível

TP-2 - Torneiras de prova 2

Figura 7.3 - Sensor de nível com eletrodos

- *Sensor de nível com bóia.* Pode ser construído de várias formas, mas os principais constam de uma garrafa ligada ao tambor de vapor e uma bóia, que flutua no seu interior. Qualquer flutuação do nível interna é transmitida a esta bóia, presa na parte superior por uma haste (3) (Fig. 7.4).

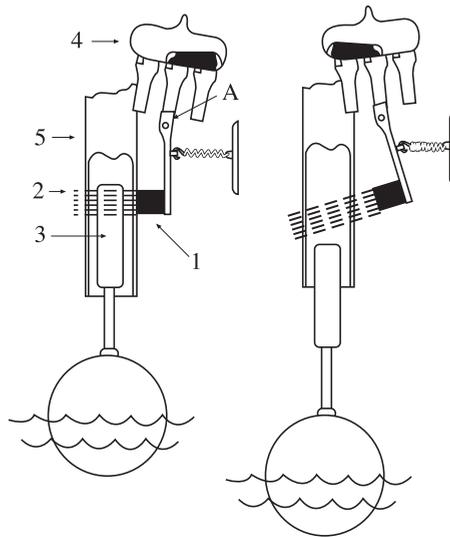


Figura 7.4 - Sensor de nível com bóia usando chaves de mercúrio (Pera, 1990)

7.2.2 Medição de pressão

O conhecimento das pressões em uma caldeira é obrigatório, não só sob o ponto de vista de segurança como também para uma operação econômica e segura. Cada caldeira tem uma capacidade de pressão determinada, que, por norma deve ter um instrumento de indicação extremamente visível, com escala também extremamente visível, e situar-se em local de fácil observação do operador. A pressão máxima de funcionamento da caldeira deverá estar sempre marcada sobre a escala do manômetro, com um traço feito à tinta vermelha, para servir de alerta ao operador para controle da pressão.

- Medidores de pressão

O mais utilizado dos medidores de pressão é o manômetro de Bourdon. A Figura 7.5 mostra suas partes internas, de forma esquemática, cujo funcionamento baseia-se na tendência de flexão, que atua sobre um tubo de bronze curvado, de seção elíptica, quan-

do é aplicada em seu interior uma pressão superior à atmosfera. Geralmente, o tubo se curva em arco de circunferência. Ao atuar a pressão no interior do tubo, sua extremidade livre descreve um pequeno movimento, que é ampliado mediante um sistema de alavancas que atuam sobre o setor dentado, fazendo girar a agulha indicadora.

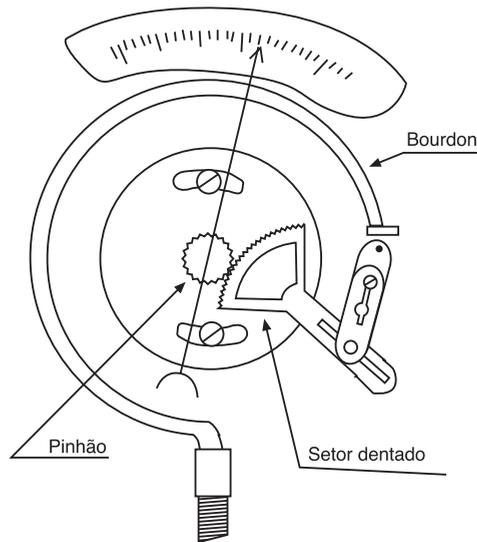


Figura 7.5 - Partes internas de um manômetro de Bourdon

Existem vários tipos de manômetros: manômetro tubular, manômetro com líquido amortecedor (glicerina ou silicone) e manômetro diferencial, além de outros tipos, que são abordados em bibliografias de instrumentação e controle, não constituindo objetivo principal do presente material. Os manômetros, de um modo geral, indicam a pressão relativa (também denominada *pressão manométrica*), e não a "pressão absoluta", pois tem que somar à pressão indicada no manômetro a pressão atmosférica local. Assim: pressão absoluta = pressão manométrica + pressão atmosférica.

A escala de um manômetro pode ser graduada em quilograma-força por centímetro quadrado kgf/cm^2 , em atmosferas atm, em libras-força por polegada quadrada lbf/pol^2 ou psi, ou em qualquer outra unidade de pressão.

■ Sensores de pressão

Com a evolução da instrumentação digital, existem hoje transdutores de pressão extremamente confiáveis e de tamanho reduzido, indicados para caldeiras nas quais o controle é item importante de segurança, como em caldeiras críticas e caldeiras de alta vazão de vapor. Entre os demais tipos de medidores, tem-se o transdutor de pressão e o com base em cristal piezo-elétrico, mais comum. Esse instrumento utiliza um cristal de quartzo, ao qual, quando aplicada pressão, apresenta variação de propriedades elétricas proporcionais às tensões (consequência das pressões) a que foi submetido. Assim, o valor da pressão exercida sobre o cristal gera uma corrente elétrica, que pode ser indicada em escalas apropriadas ou transmitida para o sistema de controle.

7.2.3 Medição de temperatura

■ Sensores de temperatura

Os termopares são pares de fios metálicos de naturezas diferentes, unidos pelas extremidades. São usados para medições de temperaturas e baseiam-se nas propriedades termoelétricas dos metais. Uma montagem esquemática é mostrada na Figura 7.6.

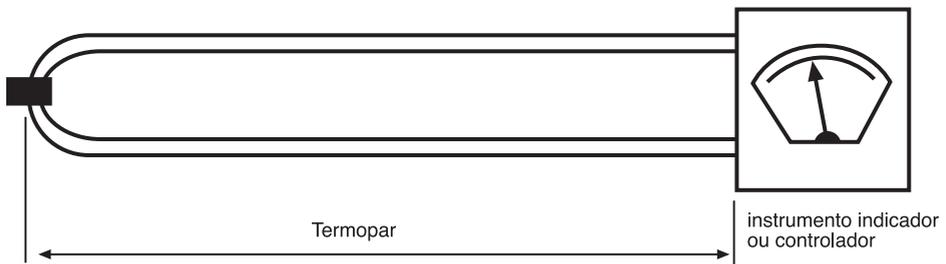


Figura 7.6 - Termopar

Os principais termopares industriais são dos tipos:

- J - ferro e constantan;
- K - chromel e alumel;
- T - cobre e constantan; e
- S - platina e platina ródio.

Nas faixas em que os termopares não atuam eficazmente utilizam-se os bulbos de resistências ou termo-resistência, que são sensores elétricos de temperatura mais precisos. Os termo-resistores se dividem em dois grupos principais:

- termo-resistores metálicos; e
- termistores.

7.2.4 Medição de vazão

Existem diversos tipos de dispositivos para medição de vazão. A Tabela 7.1 mostra uma comparação entre alguns dos mais utilizados.

TABELA 7.1 - COMPARAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO (continua)

CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEDIDOR				
	ROTÂMETRO	PRESSÃO DIFERENCIAL	TURBINA	MAGNÉTICO	ULTRA-SÔNICO
Fluidos	líquidos e gases	líquidos e gases	líquidos e gases	líquidos	líquidos
Precisão	± 2%	± 1%	± 0,5%	± 0,5%	± 3%(externo) ± 1%(interno)
Escala	linear ou logarítmica	quadrática	linear	linear	linear
Só indicação (sem energia auxiliar)	sim	sim	não	não	não
Custo	baixo	médio	médio a alto	alto	Baixo (externo) alto (interno)

CARACTERÍSTICA	TIPO DE MEDIDOR				
	ROTÂMETRO	PRESSÃO DIFERENCIAL	TURBINA	MAGNÉTICO	ULTRA-SÔNICO
Observações	<ul style="list-style-type: none"> • difícil transmissão • em geral frágil 	<ul style="list-style-type: none"> • é o medidor mais usado e conhecido • range limitado 	<ul style="list-style-type: none"> • não recomendado para fluidos abrasivos e viscosos • indicado para medição de faturamento • calibração periódica 	<ul style="list-style-type: none"> • insensível a viscosidade • sem perda de carga • bom para líquidos viscosos e corrosivos 	<ul style="list-style-type: none"> • sem perda de carga • bom para líquidos viscosos e corrosivos

Um exemplo de sensor para medição de vazão é mostrado em detalhes na Figura 7.7.

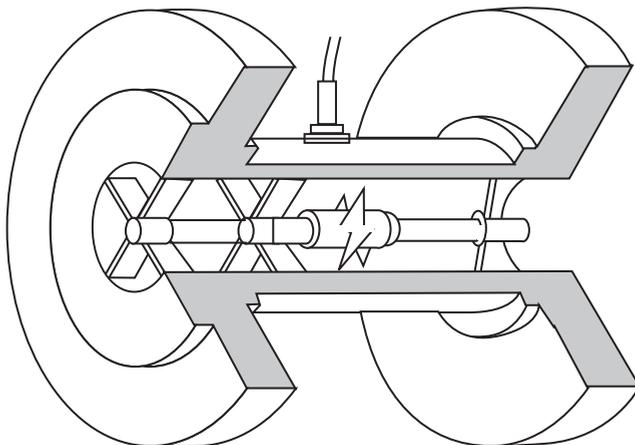


Figura 7.7 - Medidor de vazão tipo turbina

7.3 Sistemas de controle

Os principais controles de um gerador de vapor são:

- controle do nível de água do tubulão;
- controle de combustão;
- controle da pressão do vapor; e
- controle da temperatura do vapor.

7.3.1 Controle de nível de água do tubulão

O controle do nível de água do tubulão superior se faz necessário tendo em conta os seguintes fatores:

- A elevação do nível irá provocar inundação dos equipamentos de separação de umidade, causando arraste excessivo.
- A queda do nível poderá provocar perda de circulação em alguns tubos, causando seu superaquecimento.
- Durante um aumento brusco na demanda de vapor de uma caldeira ocorre a chamada "expansão" (súbita elevação do nível do tubulão), causada pela intensa formação de vapor na massa líquida, devido à queda instantânea de pressão no tubulão, ocorrendo o oposto, a chamada "contração", durante uma queda brusca na demanda de vapor.

Controle da vazão de água de alimentação

Os aparelhos de controle automático de alimentação de água dividem-se em dois grupos, identificados pelo critério de funcionamento em limites (liga-desliga) ou modulante (variação linear).

- *Controle tipo liga-desliga* - Há dois aparelhos básicos que respondem por esta característica: um denominado *regulador automático de nível*, que recebe os sinais de liga-desliga do sensor de eletrodos; e outro que recebe estes sinais do sensor de nível com bóia.
- *Controle modulante* - Pode utilizar válvulas de controle com abertura controlada por atuador externo e/ou variador de velocidade do motor da bomba de alimentação de água para caldeira. O controle é conseguido fazendo-se variar a vazão de água de alimentação e pode ser feito por vários tipos de malhas de controle.
- *Malha de controle de nível a um elemento* - Usado apenas para pequenas unidades, este sistema ajusta a vazão de água de alimentação partindo apenas da medição do nível (LT). Isto é, a ação só é tomada, pelo controlador de nível (LRC), depois que o nível se

afasta do seu "set-point". Este tipo de controle é o mais sensível aos efeitos da "expansão" e "contração", sendo por isso inadequado quando grandes oscilações de carga são esperadas (Fig. 7.8 a).

- **Malha de controle de nível a dois elementos** - Neste caso, além da medição do nível propriamente, usa-se a vazão do vapor (FT) como um antecipador, já que a principal perturbação no nível é provocada por variações na demanda de vapor. Dessa forma, a malha consegue manter a vazão de água proporcional à vazão de vapor, sendo corrigidas as eventuais diferenças por meio da medida do nível. O uso da ação proporcional + integral para o controlador (LRC) - Figura 7.8(b) – por meio neutraliza os efeitos de "expansão" e "contração".
- **Malha de controle de nível a três elementos** - É usado para o caso de demandas de vapor excessivamente variáveis um sistema mais sofisticado que o anterior. Neste caso, faz-se a medição da vazão de água de alimentação (FT) de modo a corrigi-la constantemente (Fig. 7.8 c). Da mesma forma, o controlador (LRC) possui ação proporcional + integral, a fim de neutralizar os efeitos de "expansão" e "contração".

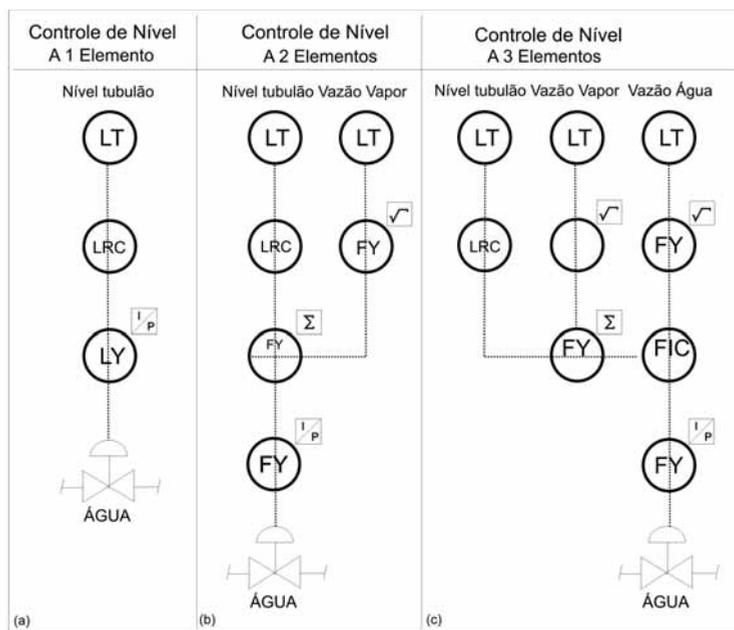


Figura 7.8 - Malhas de Controle de Nível: (a) - 1 elemento; (b) - 2 elementos; e (c) - 3 elementos

- **Controle de nível pneumático** - A Figura 7.9 mostra um exemplo de controle de nível em caldeiras, introduzindo o ar comprimido como fluido auxiliar.

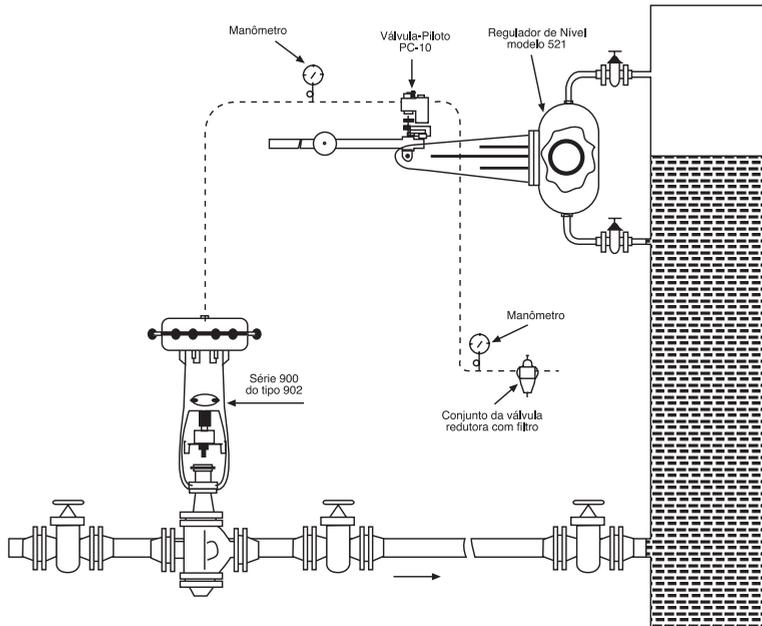


Figura 7.9 - controle pneumático de nível
Fonte: Pêra (1990)

7.3.2 Controle da combustão

O controle de combustão de uma caldeira tem por objetivo manter constante a pressão de geração de vapor, agindo para isso sobre a vazão de combustível e de ar, simultaneamente. Para se obter uma combustão eficiente, é preciso manter o excesso de ar dentro de certa faixa, evitando assim a combustão incompleta, caracterizada pela formação de fuligem, ou a operação com elevado excesso de ar. Além disso, durante uma súbita elevação na carga da caldeira, o controle deverá evitar que o acréscimo na vazão de combustível se dê mais rapidamente que o da vazão de ar, de modo a evitar má combustão.

Existem vários tipos de malhas de controle de combustão, dependendo do combustível queimado, das solicitações de demanda dos consumidores e das bem como de particularidades do sistema de combustíveis, como, por exemplo, a queima simultânea de

óleo e gás. Uma malha completa de controle de combustão pode ser dividida em várias "submalhas", como descrito a seguir.

- *Controle principal de pressão* - Para caldeiras submetidas a pequenas variações de demanda de vapor é comum adotar-se uma malha mais simples a um elemento (Fig. 7.10 a), na qual um controlador de pressão (PIC) compara a pressão no coletor de vapor com o "set-point", gerando um sinal que será enviado a todas as caldeiras que fornecem vapor a este coletor. Cada caldeira é provida de uma estação de atuação manual (HIK), que permite aumentar ou diminuir sua carga individual, mantendo-se a produção total de vapor.

Quando o sistema apresenta acentuadas oscilações de demanda, costuma-se usar a vazão de vapor como um antecipador, permitindo que o controle se antecipe, de modo a minimizar variações de pressão. Este controle, a dois elementos, é mostrado na Figura 7.10 b. Neste caso, o sinal da vazão de vapor é somado ao do controlador de pressão, gerando um sinal que será enviado a todas as caldeiras, da mesma maneira que o controle a um elemento.

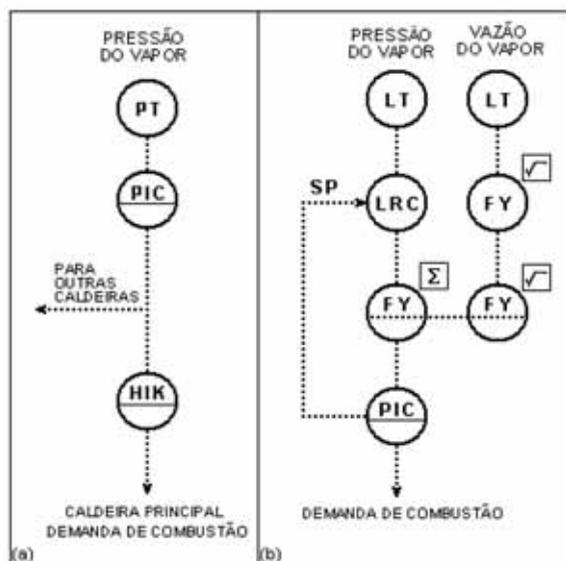


Figura 7.10 - (a) Controle de pressão a 1 elemento; e (b) Controle de pressão a 2 elementos

- *Controle da queima* - O sinal gerado por um controlador mestre deverá ser enviado a um sistema de controle capaz de alterar a taxa de liberação de calor, de modo a manter a pressão no valor desejado. Esta taxa de liberação de calor será variada pela mudança simultânea da vazão de combustível e de ar.

O controle de excesso de ar caracterizado pela ação dos relés limitadores é o responsável pela maior segurança operacional, evitando o aumento da vazão de óleo, sem o necessário aumento da vazão de ar, durante uma elevação de demanda, e vice-versa, durante uma queda. O controle de excesso de ar também poderá ser obtido de modo manual, pela atuação no controle de ar ou, automaticamente, pela ação de um analisador de oxigênio em linha que modificará o sinal de vazão de ar.

Durante a operação com cargas muito reduzidas é conveniente, por razões de segurança, trabalhar-se com maiores valores de excesso de ar. Com essa finalidade, um relé limitador mantém um valor mínimo para a vazão de ar.

Controle automático da combustão

Três são as grandezas relacionadas com o problema de malha aberta que responde pela regulação automática da combustão:

- o consumo de combustível;
- o consumo de ar para a combustão; e
- a extração dos gases formados.

O controle destas três grandezas visam:

- manter o suprimento de calor da fonte supridora, de acordo com a demanda do processo;
- assegurar um mínimo de consumo de combustível para atingir as condições propostas, ou seja, alcançar a máxima eficiência; e
- manter as condições de operação da fornalha dentro de parâmetros satisfatórios.

Os objetivos são os mesmos. A quantidade de combustível se ajusta com a pressão da caldeira, de modo que queda na pressão significa falta de combustível e excesso significa combustível a mais. Portanto, a regulagem da pressão de forma a mantê-la dentro dos limites fixados na operação implica necessariamente modificação do suprimento de combustível.

A intervenção nesta fonte de calor determina a modificação do volume de ar necessário à sua queima, dentro dos parâmetros compatíveis com uma combustão perfeita. Esta variação provocada na formação de volumes de gases de combustão deve ser monitorada por uma ação paralela que garanta a sua extração completa, de forma a assegurar uma pressão definida na câmara de combustão da caldeira.

Proteção e controle de chama

Caldeiras que usam queimadores de sólidos pulverizados (carvão), líquidos (óleo combustível, diesel, etc.) ou gasosos (gás de gasogênio, GLP, etc.) necessitam de um sistema de proteção e controle de chama para supervisionar principalmente:

- procedimento incorreto de ligação; e
- falta de chama por qualquer motivo.

Ocorrendo uma dessas falhas, a fornalha da caldeira ficaria sujeita a uma explosão, caso não houvesse a interrupção imediata do fornecimento do combustível. Conforme a concentração da mistura (ar/combustível), a magnitude de explosão poderá se tornar perigosa, causando danos ao equipamento e provocando risco de vida ao seu operador. Na maior parte, os casos de explosão ocorrem durante o acendimento da chama.

Os dispositivos usualmente empregados nestes sistemas de proteção são dos seguintes tipos:

- *Proteção por termoelétricos* - São formados por lâminas bimetálicas (lâminas de metais diferentes) e de uma chave elétrica. As lâminas bimetálicas ficam instaladas no caminho dos gases e também estão ligadas ao circuito, de tal modo que não é possível acender o queimador com a chave aberta. Acendendo a caldeira, o calor dos gases despreendidos dilata as lâminas; queimando-se a caldeira, as lâminas se contraem, abrindo e interrompendo o circuito elétrico do queimador.
- *Proteção por células fotoelétricas* - Trata-se de um sistema bem aperfeiçoado que trabalha com uma célula fotoelétrica, um amplificador e um relé. O seu funcionamento ba-

seja-se na coloração das chamas. Se estas se apagarem, a luminosidade no interior da fornalha será diminuída, a célula fotoelétrica comandará o amplificador e o relé que abrirá seus contatos, interrompendo o circuito dos queimadores.

Os sistemas fotocondutivos para segurança de chama têm quase o mesmo funcionamento dos fotoelétricos, sendo modificado o tipo de célula. Utiliza-se das irradiações infravermelhas das chamas e faz uso de amplificadores especiais. Os amplificadores conseguem estabelecer diferenças entre o calor das chamas e o calor dos refratários da fornalha.

Estes controladores funcionam como equipamentos de segurança, fazendo com que a caldeira seja parada e religada automaticamente, controlando perfeitamente a água de alimentação e os limites de pressão. Também efetua a parada de emergência comandada pelo circuito de segurança.

7.3.3 Controle da tiragem

Para que uma caldeira possa ter bom funcionamento, a tiragem tem que ser muito bem controlada. Este controle é feito por registros colocados no circuito dos gases, os quais constam de uma ou mais palhetas, que podem ser comandada manual ou automaticamente, chamados de "dampers". Atualmente, este controle pode ser executado utilizando inversor de frequência, que controla a velocidade do motor do ventilador (na tiragem forçada ou na induzida).

7.4 Dispositivos reguladores automáticos

Estes dispositivos são projetados para garantir que a caldeira funcione em perfeita segurança.

7.4.1 Pressostatos

- *Pressostato de máxima pressão* - Tem a finalidade de controlar a pressão interna da caldeira por meio de um comando para os queimadores. É constituído de um fole metálico (ou de um diafragma), que comanda uma chave elétrica, por meio de um dispositivo de regulagem da pressão. À medida que diminui a pressão dentro da caldeira, o fole (ou diafragma) se contrai, fechando o circuito elétrico e dando partida ao queimador. Quando a pressão for restabelecida, o fole (ou diafragma) se dilata e abre os contatos, interrompendo o funcionamento dos queimadores. Nas caldeiras semi-automáticas, a chave interrompe o circuito do queimador quando atingida a pressão de corte e mantém o circuito travado, impedindo que seja reacendido manualmente, até que

seja atingida a pressão de operação.

- *Pressostato de modulação de chama* - De construção quase idêntica ao pressostato de máxima pressão, faz a regulagem do óleo e do ar para os queimadores. A sua diferença para o pressostato acima é que este não faz a simples partida ou parada de motor da bomba de combustível e regulador de ar nos pontos preestabelecido de pressão. Ele regula a velocidade do motor nas pressões intermediárias às prefixadas, dando um perfeito equilíbrio ao regulador de ar-combustível. Todo este trabalho é conseguido por meio do motor modulador, que consiste (além dos enrolamentos do motor) de um relé de equilíbrio e de um reostato de balanceamento. Portanto, o motor trabalha junto com o reostato da chave moduladora.

O primeiro equipamento usado com o objetivo de controlar as caldeiras em seu regime de atuação modulada foi a chave seqüencial, que tem a finalidade de promover na caldeira um ciclo completo de operações, ou seja:

- modulação automática;
- ignição elétrica;
- apagar a caldeira por motivo de segurança;
- limitar a pressão; e
- promover a ignição automaticamente.

Seu funcionamento é parecido com o do pressostato modulador, só que, ao invés de apresentar o reostato para regulagem de velocidade do motor, apresenta um conjunto de contatos, sendo destinados um para cada operação a ser feita. Portanto, quando termina um ciclo de operação, imediatamente começa outro.

7.5 Modernos sistemas de automação e controle de caldeiras

Do ponto de vista tecnológico, o que mais avançou nos geradores de vapor foi a área de controle. Com a evolução da tecnologia, as chaves seqüenciais foram substituídas por painéis dotados de controladores lógico-programáveis(PLCs) e instrumentação de campo inteligente (Field-Bus), ligada em rede digitais com os PLCs, que, por sua vez, estão interligados em rede com computadores do sistema de controle distribuído (SCADA). Os softwares de supervisão monitoram os processos e transferem as informações "set-point" e comandos para o PLCs.

Os sistemas supervisores podem ser interligados ao sistema de gestão empresarial (ERP) e oferecer instantaneamente grande volume de informação sobre a produção e consumo do gerador de vapor, além de históricos variados de desempenho, número de horas trabalhadas e de paradas executadas. Estes sistemas têm dois componentes básicos hardware e software.

7.5.1 Hardware

- *Sistema de controle microprocessado* - O controladores lógico-programáveis microprocessados realizam as tarefas de análise e processamento dos sinais recebidos do sistema de instrumentação (variáveis de processo) e enviam sinais de controle para os atuadores ligados aos equipamentos de processo (variáveis de controle) e também facilitam a interligação com sistemas supervisórios, permitindo a troca de informações com toda a indústria. Estes sistemas utilizam microprocessador duplo e devem estar ligados à rede de energia de emergência "nobre", para maior segurança".
- *Sistema de instrumentação* - Sensores e transdutores com circuitos eletrônicos embutidos que converte em sinais elétricos analógicos ou digitais para comunicação com os PLCs. Instrumentos inteligentes (Fieldbus).

7.5.2 Software

- *Software de intertravamento (lógica de controle) dos PLCs* - Software instalado nos PLCs para executar a lógica de controle do ciclo completo de operações em conjunto com as rotinas de leitura das variáveis controladas, processamento e ajuste das variáveis manipuladas, utilizando "set-point" prédefinido ou programado externamente (execução das malhas de controle).
- *Software Sistema supervisório* - Software de supervisão e gerenciamento que se comunica com todos os controladores de processo, enviando e coletando dados destes em tempo real, com capacidade de armazenamento destes dados para a geração de gráficos de tendências e relatórios de produtividade.

As informações processadas por este software podem ser utilizadas no gerenciamento de produção de vapor, pois, além de comunicar-se com os controladores de processos instalados nos geradores de vapor, também pode ser interligado em rede com os computadores do sistema de gestão empresarial, que programa a produção da indústria, fornecendo todos os subsídios para melhorar a eficiência na produção e utilização do vapor.

8 Distribuição de Vapor

O vapor produzido longe do ponto de consumo em uma ou mais cadeiras precisa ser entregue aos pontos de consumo pelo sistema de distribuição, por meio das linhas de vapor.

8.1 Elementos para dimensionamento de linhas de vapor

O dimensionamento de linhas de vapor é um problema que envolve tanto misto entre a fluidodinâmica quanto a termodinâmica. Para o dimensionamento das linhas de vapor sob o critério estrutural, deve-se aplicar a teoria dos esforços da resistência dos materiais aos elementos especificados, estudar a flambagem dos elementos sob compressão e prever e dimensionar os esforços por dilatações térmicas. Muitas vezes, os projetos são alterados em decorrência destas condicionantes estruturais, fazendo adaptações e adequações. As principais cargas a serem consideradas são:

- pressão interna e externa;
- peso próprio da linha, peso do fluido;
- peso localizado (acessórios, peso resultante de outras linhas);
- ações dinâmicas internas (golpes de aríete, impactos, vibrações) e externas (ação do vento, da interação com máquinas de processo);
- esforços decorrentes de tensões térmicas (flexibilidade); e
- regras de segurança (visto que o fluido vapor é considerado perigoso).

Para atender a esses requisitos, são adotados os seguintes meios:

- atribuição de valores adequados para os vãos dos suportes;
- colocação de válvulas e outros acessórios próximos aos suportes;
- limitação das sobrecargas;
- especificação correta para os materiais;

- espessura de parede adequada e com sobre-espessura de corrosão; e
- especificação correta das operações de montagem (alinhamento, redução do atrito nos suportes, colocação de guias, etc).

Não é intenção deste texto entrar em detalhes sobre a parte de projeto estrutural e a formulação da resistência dos materiais para aplicação em linhas de vapor. Para o dimensionamento termodinâmico, as preocupações são com as temperaturas e pressões em que o sistema trabalhará, com as dilatações térmicas admissíveis e com as perdas térmicas admissíveis. Para esses casos, são usadas:

- juntas de dilatação e ancoragens (suportes fixos) para prevenir dilatações;
- equacionamento de acordo com a teoria termofluidodinâmica; e
- isolamento térmico adequado.

8.2 Distribuição em um sistema com várias caldeiras

Por considerações de custo, modularidade construtiva ou confiabilidade, frequentemente se adota a produção de vapor simultaneamente em múltiplas caldeiras. A Figura 8.1 esquematiza uma instalação industrial que necessita de vapor em função da produção de várias caldeiras atuando em paralelo para suprir a quantidade necessária a todo o processo fabril. Observe-se a existência de um coletor comum para receber e distribuir o vapor produzido.

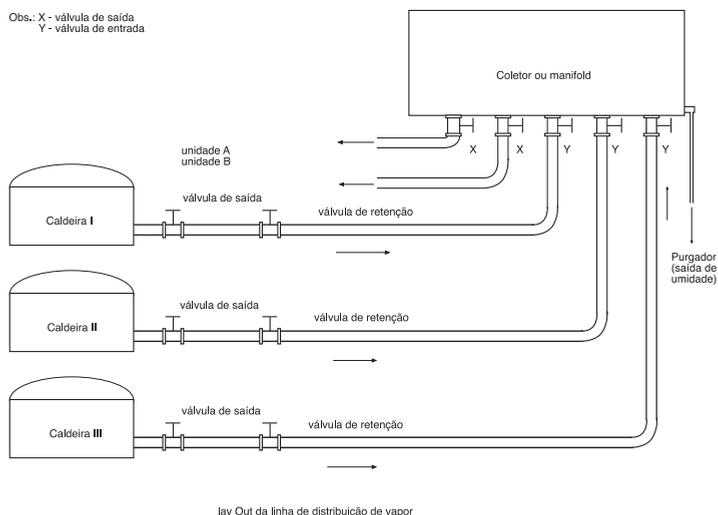


Figura 8.1 - Esquema de distribuição de vapor com várias caldeiras

Alguns cuidados importantes com relação à segurança da instalação industrial devem ser observados:

- O arranjo da linha de distribuição de vapor para os usuários deve prever a flexibilidade necessária para suprir partes individualizadas da unidade industrial com uma geração de vapor nas caldeiras de forma ordenada e convenientemente.
- Em uma situação em que três caldeiras, A, B e C, alimentam em paralelo uma instalação mediante duas linhas de distribuição de vapor, E e F, deve ser instalado um coletor, ou “manifold”, de captação do vapor gerado na saída da casa de caldeira, com três válvulas de entrada de vapor e duas válvulas de saída para o processo industrial.
- Devem existir também na instalação válvulas de retenção, importantes para permitir reparos necessários e manutenção nas caldeiras e em seus acessórios, sem que as outras sejam desligadas ou retiradas da linha. A produção de vapor deve sofrer solução de continuidade com a paralisação do processo. As válvulas contribuem, também, para a segurança dos operadores em função de vazamentos ou outras avarias operacionais.
- Essa instalação proposta no esquema com válvulas de entrada e saída no coletor - que são abertas ou fechadas de acordo com as caldeiras e que produzem vapor ou estão em reserva e com as linhas do processo em operação - reduzem em muito as perdas devidas aos vazamentos, trazendo economia e segurança.

8.3 Purgadores e separadores de vapor

8.3.1 Definições e utilidade

Os purgadores de vapor (steam-traps) são dispositivos automáticos que separam e eliminam o condensado formado nas tubulações de vapor e nos aparelhos de aquecimento, sem deixar escapar o vapor. Por essa razão, deveriam ser chamados com mais propriedade de “purgadores de condensado”. Os bons purgadores, além de removerem o condensado, eliminam também o ar e outros gases incondensáveis que possam estar presentes.

São as seguintes as causas do aparecimento de condensado em tubos de vapor:

- Em tubulações de vapor úmido, o condensado se forma por precipitação da própria umidade.
- Nas tubulações de vapor saturado o condensado aparece em consequência das perdas de calor por irradiação ao longo da linha.
- No vapor saturado ou superaquecido o condensado pode aparecer em consequência do arraste de água, proveniente da caldeira.
- Para quaisquer tubulações de vapor, o condensado também se forma na entrada em operação do sistema, quando todos os tubos estão frios (warm-up) e, também, quando o sistema é tirado de operação e o vapor vai-se condensando aos poucos no interior dos tubos.
- O condensado forma-se também em todos os aparelhos de aquecimento a vapor (serpentinhas, refervedores, aquecedores a vapor, autoclaves, estufas etc.), como consequência da perda de calor do vapor.

A remoção do condensado, do ar e de outros gases existentes nas linhas de vapor deve ser feita pelas seguintes motivos:

- Conservar a energia do vapor - o condensado não tem ação motora (máquinas a vapor) nem ação aquecedora eficiente (o vapor aquece, cedendo o calor latente de condensação). A entrada ou a permanência do condensado nesses equipamentos diminui muito a eficiência.

- Evitar vibrações e golpes de ariete nas tubulações, causados pelo condensado, quando empurrado pelo vapor em alta velocidade. Esses golpes ocorrem principalmente nas mudanças de direção, extremos de tubulações, válvulas etc., pois as velocidades usuais para vapor são bem maiores (20 a 100 vezes) que as da água, se agravando pelo fato de que o condensado é incompressível.
- Diminuir os efeitos da corrosão. O condensado combina-se com o CO_2 existente no vapor formando o ácido carbônico, com ação corrosiva.
- Evitar a redução da seção transversal útil de escoamento do vapor devido à acumulação do condensado.
- Evitar o resfriamento do vapor em consequência da mistura com o ar e outros gases.

8.3.2 Casos típicos de emprego de purgadores

Os purgadores de vapor são empregados em dois casos típicos:

- para a eliminação do condensado formado nas tubulações de vapor em geral; e
- para reter o vapor nos aparelhos de aquecimento a vapor (aquecedores a vapor, serpentinas de aquecimento, autoclaves, estufas etc.), deixando sair apenas o condensado.

Convém que a distinção entre esses dois casos seja claramente entendida, porque o sistema de instalação do purgador, em um caso ou em outro, é completamente diferente.

Quando instalados com a finalidade de drenar linhas de vapor, os purgadores são colocados em uma derivação da tubulação, como mostra a Figura 8.2. Essa derivação deve sair do fundo de uma bacia denominada *acumulador de condensado (drip-pocket)*, instalada na parte inferior da tubulação de vapor.

O condensado deve sempre ser capaz de correr por gravidade para dentro do acumulador. A tubulação de entrada do purgador deve estar ligada diretamente ao fundo do acumulador. Devem ser colocados obrigatoriamente purgadores para drenagem de condensado nos seguintes pontos de todas as tubulações de vapor, como mostra a Figura 8.3.

- em todos os pontos extremos (no sentido do fluxo) fechados com tampões, flanges cegos, bujões etc;
- em todos os pontos baixos e todos os pontos de aumento de elevação (colocados, nesses casos, na elevação mais baixa);

- nos trechos de tubulação em nível deve ser colocado um purgador em cada 100 m a 250 m (quanto mais baixa for a pressão do vapor, mais numerosos deverão ser os purgadores);
- imediatamente antes de todas as válvulas de bloqueio, válvulas de retenção, válvulas de controle e válvulas redutoras de pressão (os purgadores destinam-se, neste caso a eliminar o condensado que se forma quando a válvula estiver fechada); e
- próximo à entrada de qualquer máquina a vapor, para evitar a penetração de condensado na máquina.

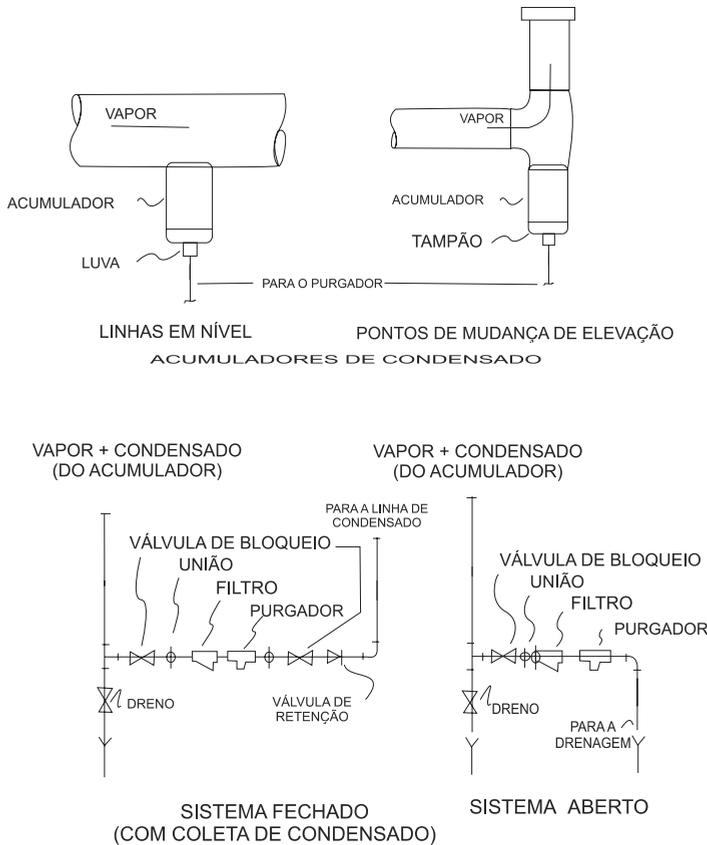


Figura 8.2 - Purgador para drenagem de linhas de vapor.

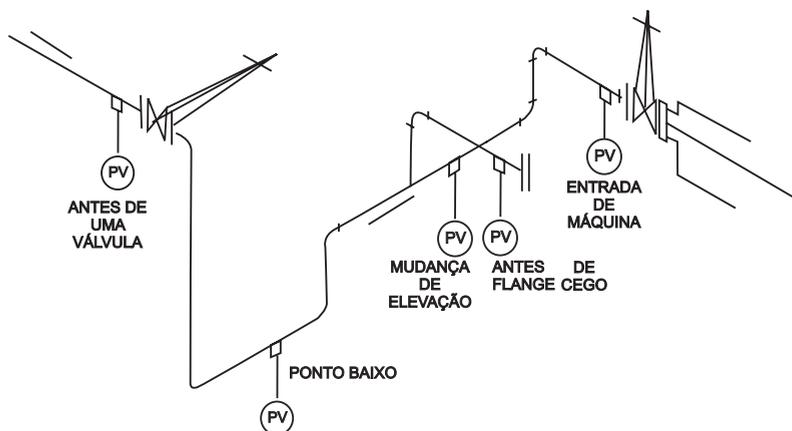


Figura 8.3 - Pontos de colocação de purgadores para drenagem de linhas.

Os purgadores instalados com a finalidade de reter o vapor em aparelhos de aquecimento devem ficar na própria tubulação de vapor e colocados o mais próximo possível da saída do aparelho. A finalidade desses purgadores é aumentar ao máximo o tempo de permanência do vapor dentro do aparelho, para que o vapor possa ceder todo o seu calor. Se não houvesse o purgador, o vapor circularia continuamente à alta velocidade. Para que a troca de calor seja a mesma, o comprimento da tubulação de vapor dentro do equipamento é proibitivo. Não havendo o purgador, o consumo seria exagerado, haveria desperdício de vapor e, conseqüentemente ocorreria, um baixo rendimento global do sistema de aquecimento. A instalação do purgador representa sempre considerável economia de vapor e, portanto, de combustível e de dinheiro. Por todas essas razões, é obrigatória a colocação de purgadores de vapor na saída de qualquer aparelho de aquecimento a vapor.

8.3.3 Principais tipos de purgadores de vapor

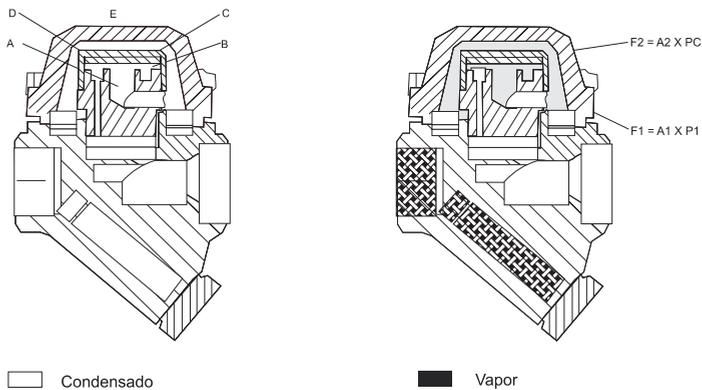
■ Purgador termodinâmico

Trata-se de um aparelho de construção simples, cuja única peça móvel é um disco que trabalha dentro de uma pequena câmara abrindo ou fechando, simultaneamente, as passagens que dão para a entrada de vapor e para a saída de condensado.

A Figura 8.4 apresenta um esquema de um purgador termodinâmico específico que serve de base para a explicação de seu funcionamento. O condensado ou o ar chegam ao purgador em (A), são empurrados pela pressão do vapor, levantam o disco (D) e escapam

para fora. Chegando o vapor, a princípio ele escapa também, mas logo em seguida o jato de vapor, em alta velocidade, passa por baixo do disco em (B), cria uma zona de baixa pressão, e o disco abaixa-se, tendendo a fechar a saída do vapor. Assim que o disco começa a se abaixar, o vapor passa para a câmara (C) acima do disco, e a pressão do vapor força o disco para baixo. Ao mesmo tempo, esse movimento do disco causa uma redução na seção de saída do vapor. Em consequência, a velocidade aumenta, assim como a depressão causada, até que o disco encosta-se na sede, fechando a saída do vapor.

Como a área útil da face superior do disco (a_2) é muito maior do que a área útil da face inferior (a_1), a pressão do vapor retido acima do disco mantém o purgador fechado, com o disco apertado contra a sede, enquanto houver vapor quente no purgador. Com a chegada do condensado (mais frio do que o vapor) no espaço (E), o vapor retido acima do disco começa a se condensar, perde pressão, e o disco levanta-se, repetindo-se todo o ciclo. Note-se que a velocidade de escoamento do vapor é sempre muito maior do que a velocidade do condensado, devido ao grande volume específico do vapor. Quando o purgador se abrir, em consequência da condensação do vapor retido acima do disco, se não houver condensado para sair, escapará um pouco de vapor em alta velocidade, que, preenchendo o espaço acima do disco, fechará de novo rapidamente o purgador.



- A - canal ascendente ou de entrada
- B - fluxo radial
- C - câmara de controle
- D - disco
- E - espaço da camisa de vapor

- F_1 - força de abertura
- F_2 - força de fechamento
- a_2 - área total do disco
- a_1 - área do disco submetida a pressão P_1
- P_1 - pressão de entrada
- P_c - pressão da câmara de controle

Figura 8.4 - Esquema de funcionamento dos purgadores termodinâmicos

Esse purgador é barato, pequeno, simples e de baixa manutenção. É muito usado para linhas de vapor e para linhas de aquecimento, desde que a quantidade de condensado não seja muito grande. Não deve ser usado quando a contrapressão do condensado for superior a 50% da pressão do vapor ou quando a pressão do vapor for inferior a 0,7 kg/cm². Pode, entretanto, ser empregado para altas pressões e altas temperaturas. Os purgadores termodinâmicos são fabricados com bocais rosqueados de diâmetros nominais de 3/8 "a 1", para capacidades de eliminação de condensado até 3.000 kg/h. Por serem peças pequenas e sujeitas a severas condições de corrosão e erosão, esses purgadores são construídos integralmente de aço inoxidável.

■ Purgador de bóia

Este tipo de purgador é composto de corpo e tampa, fabricado em ferro fundido ou aço carbono. É projetado para resistir a pressões de até 32 kgf/cm², dispondo de um orifício de entrada para vapor com condensado e um orifício de saída do condensado. No seu interior, contém um sistema "sede" (válvula) para manter vedado o orifício de saída e que suporta uma bóia flutuante, que fará a abertura e fechamento da sede. Tanto a bóia quanto a sede são fabricadas em aço inox. Contém, também, um furo plugado na parte inferior, para drenagem manual e limpeza preventiva. Possui alta capacidade de descarga (até 50 toneladas/hora), mesmo com baixas pressões diferenciais.

O purgador de bóia é equipado com eliminadores termostáticos de ar (3), que removem, automaticamente, todo o ar e gases incondensáveis que atingem o purgador. Sendo de pressão balanceada, ajustam-se automaticamente para qualquer pressão do trabalho, sem necessidade de regulagens. Localizados acima de nível de condensado, descarregam o ar e gases incondensáveis assim que estes chegam ao purgador.

■ Purgador de balde invertido

Neste modelo de purgador, o corpo e a tampa são construídos em ferro fundido e os elementos internos em aço inox. O corpo contém um orifício para entrada de condensado, enquanto que um outro orifício tem a função de eliminar o ar acumulado e o condensado. Internamente, uma válvula com sede semi-esférica, que controla a saída dos elementos purgados, é acionada por uma peça com formato de um balde invertido, pois é montada com o bocal voltado para baixo. No fundo deste balde há um pequeno orifício, cuja finalidade é fluir os gases (ar, CO₂) provenientes da linha de operação. Este furo não deverá ser obstruído, senão a válvula poderá não funcionar. No fundo do corpo do purgador existe um furo plugado, cuja a finalidade é fazer a drenagem manual e a limpeza preventiva do interior do equipamento. Na parte superior da tampa existe outro orifício

plugado, acessível à válvula semi-esférica, para limpeza do furo de drenagem do condensado.

■ Purgador termostático de fole

Geralmente, é fabricado totalmente em aço inoxidável, sendo o fole flexível, neste caso, composto de vários pares de lâminas soldadas e preenchido com um líquido volátil, cujo ponto de ebulição está abaixo ao da água em qualquer pressão.

■ Purgador termostático de expansão bimetálica

Neste tipo de purgador, normalmente, o corpo e a tampa são construídos em aço carbono forjado. As peças integrantes da válvula de vedação são de aço inox. O diafragma é fabricado com material bimetálico (material adquirido pelo processo de soldagem por impacto - explosão - de dois materiais com coeficientes de dilatação diferentes). Há diversas faixas de capacidade de operação, segundo os fabricantes, mais comumente entre 0,7 a 41 [bar] de pressão e temperatura entre 250 a 400 [°C].

8.3.4 Seleção dos purgadores de vapor

A escolha do purgador de vapor adequado para um determinado serviço é feita em duas etapas: na primeira, seleciona-se o tipo; na segunda, determina-se o tamanho que deve ter o purgador. O tamanho do purgador é relacionado principalmente a sua capacidade de eliminação de condensado.

Os seguintes os fatores influem na escolha de um purgador:

- natureza da instalação e finalidade do purgador;
- pressão e temperatura do vapor na entrada do purgador;
- pressão na descarga do purgador;
- pressão e temperatura do condensado (no caso de linha de retorno);
- quantidade de condensado a ser eliminada, por hora ou por dia;
- frequência da purga de condensado;
- perda admitida de vapor vivo;

- quantidade de ar e de outros gases presentes no vapor;
- ocorrência de golpes de aríete ou de vibrações na tubulação;
- ação corrosiva ou erosiva do vapor ou do condensado;
- facilidades necessárias de manutenção; e
- custo inicial.

Para a determinação da pressão do vapor na entrada do purgador, devem ser consideradas as perdas de carga até este. Da mesma forma, quando a descarga do condensado se faz para uma linha de retorno as perdas de carga nessa linha têm de ser consideradas para se obter a pressão do condensado na saída do purgador. Se as condições de pressão do vapor, do condensado ou de ambos forem variáveis, o purgador deverá ser selecionado para a mínima pressão do vapor e para a máxima pressão do condensado, isto é, para a menor pressão diferencial entre a entrada e a saída do aparelho.

Para qualquer purgador, a capacidade de eliminação de condensado é sempre função da pressão diferencial através do purgador e da temperatura do condensado. Quanto menor for a pressão diferencial, menor será a capacidade de eliminação, e vice-versa. A capacidade diminui também com o aumento de temperatura do condensado, devido à maior formação de vapor por descompressão na saída do purgador. Por essa razão, todos esses aparelhos devem ser dimensionados em função da menor pressão diferencial e da maior temperatura do condensado possíveis de ocorrer.

A quantidade de condensado a ser eliminada é o dado mais difícil de se estabelecer, porque depende de um grande número de fatores muito variáveis. No caso de tubulações, devem ser consideradas três parcelas para o cálculo:

- o condensado formado pela perda de calor para atmosfera pela tubulação;
- o condensado formado quando do aquecimento inicial da tubulação, no início da tubulação; e
- o condensado formado quando da parada de operação, pela condensação do vapor presente na tubulação.

Todas essas parcelas são dependentes da temperatura ambiente. A primeira será função da temperatura normal do vapor em operação, e esta perda será a responsável pela

necessidade de purga de condensado constante do sistema. Os poços de condensado devem ser dimensionados e distribuídos ao longo da tubulação conforme esta vazão. A segunda dependerá da massa a ser aquecida e do volume contido no trecho (comprimento do trecho de tubulação e seu diâmetro). A terceira será função da quantidade de vapor remanescente na tubulação após a despressurização. Nestes dois últimos casos, parte do vapor também é lançada à atmosfera e o sistema é despressurizado, não havendo, portanto, pressão necessária ao funcionamento do purgador.

Para calcular a necessidade mais próxima da real de purgadores, devem-se proporcionar as parcelas acima, conforme as características operacionais da indústria. Trechos sujeitos a parada frequentes ou de fluxo “morto” tornarão a segunda e a terceira parcelas mais significativas. Na maior parte dos casos, no entanto, é preciso concentrar-se no cálculo da primeira parcela. É mais prático atender aos casos de parada e partida, pela distribuição de drenos e “vents” ao longo da tubulação, de forma a permitir a drenagem mais eficiente do condensado formado.

Quanto aos equipamentos de aquecimento, os dados de consumo de calor de projeto devem nortear o cálculo da vazão de condensado. Fixado o tipo de purgador e calculadas a pressão diferencial mínima e a quantidade de condensado, a escolha do modelo adequado resume-se a uma consulta aos catálogos dos fabricantes. Para selecionar o modelo adequado, deve-se entrar com a pressão diferencial mínima e a quantidade máxima de condensado a eliminar.

O Gráfico 8.1 mostra um diagrama de capacidade para purgadores termodinâmicos, com a vazão de descarga X pressão diferencial do purgador. Como exemplo, um purgador de 1/2” de diâmetro com uma pressão diferencial de 7,5 bar remove aproximadamente 370 kg/h de condensado.

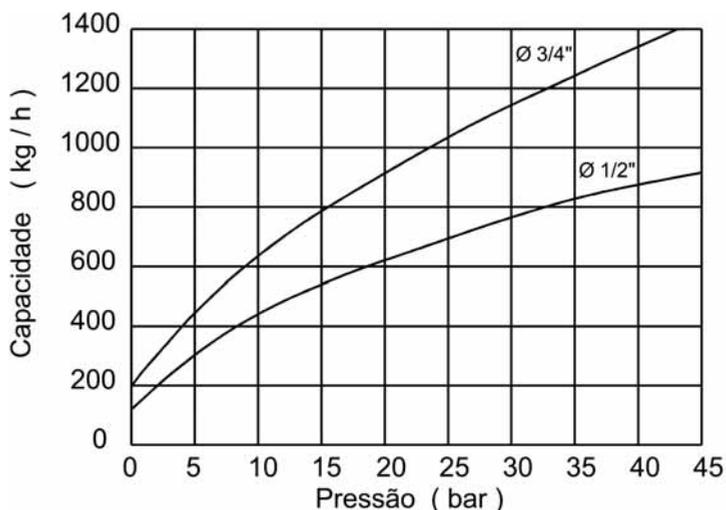


Gráfico 8.1 - Diagrama de vazão de condensado de purgadores.

8.4 Separadores de umidade para linha de vapor saturado

Para que qualquer parte de uma instalação a vapor possa trabalhar com a máxima eficiência, é necessário que se forneça a ela o vapor no estado mais seco possível. Se assim não for, a espessura da película de água aumentará sobre a superfície de transferência de calor e o rendimento cairá. Causará ainda falhas nas válvulas e nos seus assentos, e os controles serão dificultados. Purgadores bem escolhidos e instalados vão retirar todo o condensado que se formará nas tubulações e equipamentos, mas não vão fazer nada com a mistura de água, que é muito pequena e está em suspenso no próprio vapor.

A origem dessa mistura está freqüentemente, nas gotículas de água que se acham nas paredes das tubulações. Quando o vapor circula, elas são arrastadas. Outra causa comum é originada de uma alta demanda de vapor sobre a caldeira, sendo que o problema pode tornar-se bastante sério com as modernas instalações de caldeiras compactas, as quais têm reduzido espaço para o vapor em seu interior. Como solução podem ser instalados secadores, ou separadores de vapor, sempre drenados por purgadores apropriados. Isso remove a massa de gotículas de água, fornecendo ao processo um vapor razoavelmente seco.

O processo de separação é relativamente simples. Provoca-se uma diminuição de ve-

locidade do vapor, pelo aumento do diâmetro do separador em relação à tubulação, e, em seguida, força-se, através das placas, a mudança de direção do fluxo e, assim, a separação de partículas d'água em suspensão no vapor. Após a separação, o vapor seco passará para os equipamentos e o condensado será drenado para fora do sistema, através de um purgador.

Recomenda-se a instalação de separadores em cada um dos ramais secundários de alimentação dos equipamentos e de um separador logo após a saída das caldeiras. Outra recomendação que também é feita é quanto à instalação de separadores de umidade antes de cada uma das válvulas controladoras de pressão e/ou temperatura, para evitar que partículas de água ou sólidos passem a altas velocidades pelas sedes, causando desgaste por erosão e aumentando os gastos com manutenção.

8.5 Isolamento térmico

8.5.1 Estruturas dos isolantes

Os isolantes térmicos convencionais do tipo não condutor recebem esse nome porque em sua estrutura armazena-se grande quantidade de ar, que, praticamente, não transmite calor por convecção. Tal situação se, de um lado, fornece isolante eficiente e adequado às condições usuais, de outro, apresenta um limite mínimo intransponível para a eficiência desses materiais, ou seja, a condutibilidade do ar, 0,02 Kcal/h.m.°C. Os melhores isolantes desse tipo têm condutibilidade próxima de 0,03 Kcal/h. m. °C. Segue uma breve descrição dos quatro principais tipos de estrutura.

- Isolantes refletivos - Os materiais mais comumente usados são folhas metálicas, com grande poder refletor de ondas de calor, com baixa absorção e emissividade dessas mesmas frequências. Os materiais mais comuns para uso como isolantes refletores são o alumínio e os aços inoxidáveis, pela sua reflexão das ondas infravermelhas e visíveis, inalteráveis ao longo de sua vida útil.
- Isolantes fibrosos - Os materiais mais usuais nesta classe são as lãs de rocha, de escória e de vidro, o asbesto, o feltro e a madeira. Para o isolamento de equipamentos frios, devem ser bem impermeabilizados, pois são higroscópicos. A compactação das fibras não deve favorecer nem a condução nem a convecção natural. Assim, uma compactação excessiva aumenta o contato entre as fibras, facilitando a condução de calor. De outro lado, uma compactação insuficiente aumenta os espaços com ar, podendo facilitar a convecção natural. As fibras com diâmetros entre 1 e 15 [µm] retêm o ar, resistindo à transferência de calor por condução.

- Isolantes granulares - Comumente constituídos de grânulos, que, isolados ou aglomerados, prendem ar, dificultando sua movimentação, fazendo com que a transferência de calor seja mínima. Os materiais mais comuns são o silicato de cálcio, a magnésia, a diatomita e a cortiça.
- Isolantes celulares - São materiais altamente porosos, porém impermeáveis. Isto é, apesar de serem constituídos de microcélulas, estas não são interconectadas. Desta maneira, a convecção é mínima e a condução restringe-se às paredes das microcélulas. As espumas sólidas modernas são exemplos típicos. Nesses isolantes é facilmente utilizável o enchimento dos poros com os mais diversos gases, aumentando a eficiência de isolamento térmico. Os materiais usuais são as espumas de borracha, de vidro, espumas plásticas (estireno, poliuretano) e o aerogel de sílica.

O Quadro 8.1 apresenta exemplos de formas e aplicações de isolantes térmicos

QUADRO 8.1 - FORMA FÍSICA E ADEQUAÇÃO DOS ISOLANTES TÉRMICOS

FORMA FÍSICA DOS ISOLANTES TÉRMICOS	TUBO	VASO	FLANGE, VÁLVULA, BOCA DE VISITA	FORMA COMPLEXA
Rígidas	Uso geral	Não se recomenda expansão com extremas tensões	Recomendado	Não recomendado
Enchimento	Não recomendado	Não recomendado	Não recomendado	Recomendar, pode-se colocar forma na caixa.
Flexíveis	Recomendar só com uso de revestimento metálico	Recomendado para uso geral	Recomendar, se necessário freqüente acesso.	Superior a opção do plástico. Melhor é enchimento
Fitas flexíveis	Uso temporário	Não recomendado	Não recomendado	Não recomendado

FORMA FÍSICA DOS ISOLANTES TÉRMICOS	TUBO	VASO	FLANGE, VÁLVULA, BOCA DE VISITA	FORMA COMPLEXA
Plásticos	Recomendar para sistemas pequenos e complexos	Recomendar a pistola para grandes vasos	Recomendado para pequenas válvulas, quando em uso de material rígido	Recomendar quando o fecho é difícil em uso a pistola p/ dutos retangulares

8.5.2 Seleção dos materiais para isolamento térmico

Atualmente, há grande variedade de materiais para isolamento térmico interpenetrando em uma mesma faixa de temperatura. Para escolher o mais racionalmente possível e especificá-lo corretamente, devem-se considerar diversos fatores. Os mais importantes são os seguintes: temperatura da superfície a ser isolada, condutividade térmica, resistência mecânica, absorção de umidade, Inflamabilidade e custo.

Podem ser usados três métodos de cálculo de espessura do isolante térmico em uma dada tubulação, vaso ou equipamento:

- Método da perda térmica máxima permissível;
- Método da espessura necessária à proteção do pessoal; e
- Método da espessura econômica.

O primeiro método é baseado na teoria da transferência de calor. Sua especificação é resultante das condicionantes das formas existentes de transferência de calor. O segundo método, também sujeito à teoria de transferência de calor, adota como critério as normas de segurança do Ministério do Trabalho, que impõe temperaturas de parede compatíveis com a segurança dos operadores. O terceiro método interage condições térmicas com os valores de investimentos a serem realizados.

8.5.3 Espessura para proteção de pessoal

Ao se tocar uma superfície com temperatura próxima a 80°C, não havendo rápida retirada da mão, há queimadura imediata. Temperaturas superiores conduzem a queimaduras graves, enquanto temperaturas até 60°C são suportáveis pelo ser humano, sem da-

nos aos tecidos. Este processo de cálculo leva em conta as peculiaridades acima expostas e considera primordial o fator segurança, ou seja, a temperatura superficial da cobertura do isolante, a qual não deve ser superior a 60°C. Esta consideração básica simplifica o cálculo, podendo-se usar as diversas fórmulas, tabelas e gráficos fornecidos pelos fabricantes. A Tabela 8.1, apresenta-se um exemplo da espessura de isolamento, silicato de cálcio, em função da temperatura do tubo e do seu diâmetro.

TABELA 8.1 - ESPESSURAS DE ISOLAMENTO RECOMENDADAS (MM)

ϕ nominal [pol]	TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO TUBO (°C)									
	40 a 90	90 a 150	150 a 200	200 a 260	260 a 315	315 a 425	425 a 480	480 a 540	540 a 590	590 a 650
1 1/2	25	25	40	50	50	65	65	75	75	75
2	25	25	40	50	50	65	75	75	90	90
2 1/2	25	25	40	50	50	65	75	75	90	90
3	25	25	40	50	50	65	75	90	90	90
4	25	40	50	50	65	65	75	100	100	100
5	25	40	50	50	65	75	90	100	100	110
6	25	40	50	50	75	75	90	100	100	110
8	40	40	50	65	75	75	90	100	110	130

8.5.4 Determinação da espessura econômica do isolamento térmico

Quando se considera o objetivo único de minimizar os custos ao longo da vida útil do equipamento isolado termicamente, a espessura é determinada levando-se em conta os seguintes itens:

- custo do isolante, incluindo a aplicação;
- custo da geração do calor;
- custo de amortização do investimento;
- depreciação dos materiais e equipamentos isolados;
- fatores térmicos (condutividades, temperaturas) e dimensões;
- tempo de operação; e
- custo da manutenção do isolamento.

Um exemplo de resultado do cálculo da espessura mínima de isolamento em relação aos custos envolvidos com o sistema em análise é mostrado no Gráfico 8.2.

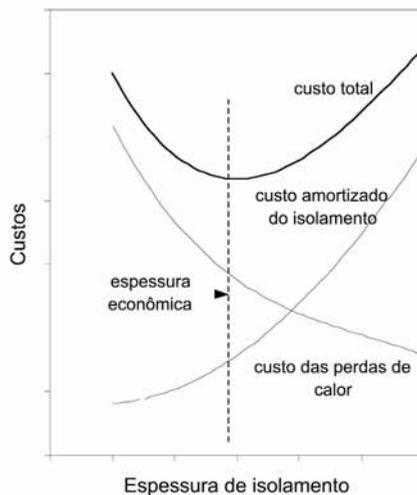


Gráfico 8.2 - Relação custos de investimentos com a espessura de isolamento

Um dos processos mais usados para o cálculo da espessura econômica consiste em igualar a zero a derivada do custo total e determinar o valor do custo mínimo. É o que normalmente se apresenta em tabelas e nomogramas fornecidos pelos fabricantes de isolamento. Os principais dados para a entrada são:

- a condutividade térmica do isolante, apresentada nos catálogos ou obtida por meio de testes (recomenda-se aumentar em 20% o valor desse coeficiente, levando-se em conta a redução da eficiência ao longo da vida útil);
- o coeficiente de convecção, obtido por fórmulas empíricas ou tabelas;
- o prazo de amortização (varia com o equipamento, fixado para cada caso);
- o preço da energia, calculado com base nos custos do combustível e outros associados a geração de calor;
- o custo do isolante; e
- temperaturas, fixadas em função do processo ou da aplicação.

9 Operação de Geradores de Vapor

Atualmente, as empresa que produzem e utilizam vapor como uma utilidade industrial aplicada aos seus processos produtivos necessitam possuir um manual com a caracterização de seus geradores e procedimentos padrões adotados para suas operações, tanto para partida, operação em quaisquer condições ou parada. Estes procedimentos devem seguir normas de segurança capazes de garantir o correto funcionamento dos geradores, mantendo elevados os níveis de segurança e eficiência energética na produção de vapor e, se possível, atender aos padrões de descrição de processos adotadas pelas normas ISO-9002 e ISO-14000.

Sempre caberão aos operadores e técnicos as funções de supervisão geral dos controles e a tarefa mais difícil e intelectual, que é operar de forma otimizada e com segurança os sistemas de vapor, evitando interrupções ou contornando situações de emergência. Vale observar que as estatísticas internacionais demonstram que as ocasiões de maior risco de acidentes com caldeiras são as de partida as de parada. Assim, as intervenções do pessoal responsável em quaisquer das etapas, seja partida, operação normal ou parada, exige bons conhecimentos de caldeiras e dos sistemas associados, por serem equipamentos perigosos e com alto nível de risco quando operados por pessoas não-habilitadas. Esse risco é de tal ordem que existe uma legislação própria para habilitação do pessoal responsável e para as inspeções em geradores de vapor: a Norma Regulamentadora 13, conhecida como NR-13, do Ministério do Trabalho, incluída no CD-ROM anexo a este Livro. Os procedimentos descritos neste capítulo servem como referência geral para estabelecer rotinas e precauções que, além dos riscos de danos a equipamentos, envolvem riscos humanos que não podem ser desprezados.

9.1 Identificação de geradores de vapor

9.1.1 Placa de identificação da caldeira e registro de segurança

Segundo a norma NR-13, toda caldeira deve apresentar em sua superfície externa, em local bem visível, placa identificadora com, no mínimo, as seguintes informações:

- nome do fabricante;
- número de ordem dado pelo fabricante da caldeira;

- ano de fabricação;
- pressão máxima de trabalho admissível;
- pressão de teste hidrostático;
- capacidade de produção de vapor;
- área de superfície de aquecimento; e
- código de projeto e ano de edição.

Toda empresa que possui caldeiras deve manter um prontuário atualizado, com documentação original do fabricante, abrangendo, no mínimo, especificações técnicas, desenhos detalhados, tipo de revestimento, provas ou testes realizados durante a fabricação e montagem, características funcionais e a fixação da respectiva PMPT, além de laudos de ocorrências diversas, que constituirão o histórico da vida útil da caldeira.

Além do acima previsto, a empresa deverá possuir o "Registro de Segurança" atualizado, constituído de livros próprios, com páginas numeradas ou outro sistema equivalente, onde serão anotadas, de forma sistemática, as indicações de todas as provas efetuadas, inspeções interiores e exteriores, limpeza e reparos, e quaisquer outras ocorrências, tais como: explosões, incêndios, superaquecimentos, rupturas, troca de tubos, tambores ou paredes, deformações, aberturas de fendas, soldas, recalques e interrupções de serviços.

Em conformidade com a norma NR-13, toda caldeira deve possuir "Manual de Operação" atualizado, em língua portuguesa, disponível em local de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo:

- procedimentos de partidas e paradas;
- procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;
- procedimentos para situações de emergência; e
- procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

9.1.2 Princípios para operação segura de caldeiras

Para manter a segurança das caldeiras e, de forma geral qualquer, aparelho de vapori-

zação, é importante observar os seguintes princípios:

- A pressão de trabalho deve estar sempre abaixo da Pressão Máxima de Trabalho Permitida (PMTP) ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), que é o maior valor de pressão compatível com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais.
- A válvula de segurança deve ter a pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA.
- Possuir injetor ou outro meio de alimentação de água, independente do sistema principal, em caldeiras combustível sólido.
- Sistema de indicação para controle do nível de água ou outro sistema que evite o superaquecimento por alimentação deficiente.
- Operadores qualificados e treinados para operar cada caldeira, com suas características específicas.

9.2 Procedimentos de partida

Antes da partida propriamente dita, é necessário executar uma série de verificações em todos os sistemas componentes da caldeira e das suas interligações com o ambiente externo, as quais incluem, basicamente, a verificação dos seguintes equipamentos ou sistemas:

- ar para combustão - devem estar operando adequadamente ventiladores, dutos, registros, etc;
- queimadores - devem estar limpos, corretamente montados e posicionados, funcionando adequadamente;
- instrumentos de supervisão e controle - devem estar calibrados, testados e alinhados;
- suprimento de energia elétrica para todos os instrumentos, equipamentos e sistemas;
- válvulas de segurança - devem estar calibradas, testadas e livres para operar;
- portas de visita e janelas de inspeção da caldeira - devem estar fechadas;

- sistema de água de alimentação - deve estar preparado para funcionar ou, em linguagem de indústria, alinhado;
- sistema de óleo combustível - alinhado;
- tanques de água e de óleo - devem estar com nível o adequado;
- sistema de injeção de produtos químicos - alinhado; e
- intertravamentos e sinalizações - devem estar testados e ajustados.

Efetuada estas verificações preliminares, como próximo passo a caldeira deverá ser preenchida com água de alimentação até o nível de acendimento. Nessa ocasião, verifica-se previamente a consistência de leitura entre o indicador de nível local e o remoto. Em caso de problemas, corrigi-lo antes de prosseguir.

Quando a caldeira está sendo preparada para a partida, as seguintes condições adicionais devem ser estabelecidas:

- suspiros do tambor de vapor aberto;
- válvulas de descarga (*blow down*) da caldeira fechadas;
- nível de água no tambor estabelecido a pelo menos duas polegadas acima do fundo do indicador de nível local;
- válvulas de saída de vapor da caldeira fechadas mas não apertadas; e
- bomba de água de alimentação disponível e pronta para operar.

A seguir, precisa-se prover ar de combustão para a fase de acendimento. Caso haja pré-aquecedor de ar regenerativo, deve ser colocado em operação. Em função do teor de enxofre do combustível a ser usado, coloca-se em operação também o pré-aquecedor de ar a vapor, para assegurar que não haja condensação dos produtos de combustão corrosivos nas superfícies metálicas. Dependendo da existência e do tipo de superaquecedor, medidas específicas deverão ser tomadas para sua proteção, já que em geral este equipamento não terá fluxo de vapor durante a partida, conforme adiante se comenta.

O ventilador deverá ser acionado de modo a garantir uma vazão mínima de ar para purga de eventuais combustíveis gasosos do interior da caldeira, que poderiam provocar

condições explosivas no momento da ignição. Usualmente, o valor mínimo é 30% da vazão à máxima carga e o tempo de duração da purga é controlado pelo sistema de intertravamento. Este sistema é constituído de um conjunto de sensores, relés e acionadores, que asseguram a prevenção contra seqüências de eventos que possam ser danosas para a caldeira, evitando as operações ou ocorrências em situações inseguras. Nesse caso, o sistema de intertravamento impede o acendimento de qualquer queimador antes que a purga se complete. Um valor usual para o tempo de purga é 5 minutos, sendo uma etapa crítica do procedimento de partida, para assegurar as condições de segurança na ignição.

Com a purga completada e havendo vazão de ar suficiente, o acendimento poderá ter início. O sistema de intertravamento já deverá ter liberado a abertura das válvulas de fechamento rápido (*shut-off*) do combustível, que poderá ser admitido até o queimador. As válvulas de fechamento rápido são empregadas em queimadores para líquidos e gases, com a função de bloquear a entrada de combustível na fornalha, por razões de segurança. O processo de acendimento dos queimadores varia de caldeira para caldeira. O sistema mais adequado é o que usa ignitores elétricos, também liberados pelo intertravamento somente após completado o tempo de purga.

O número de queimadores a serem acesos na fase inicial depende do tipo de caldeira, mas sempre o aquecimento deverá ser controlado e progressivo, respeitando-se a curva temperatura x tempo do equipamento, fornecida pelo fabricante, como se exemplifica no Gráfico 9.1. O combustível usado na partida, quando for possível fazer opção, deve ser o que apresente menores problemas de queima, preferindo-se usar combustível gasoso de bom poder calorífico (gás natural, gás de processo e GLP) aos combustíveis líquidos. Na opção por combustíveis líquidos, em primeiro lugar, devem ser adotados os menos viscosos e menos densos, antes dos mais viscosos e densos (óleo diesel antes de óleo combustível). Estes cuidados se justificam para assegurar a manutenção de uma chama estável e o aquecimento correto da fornalha.

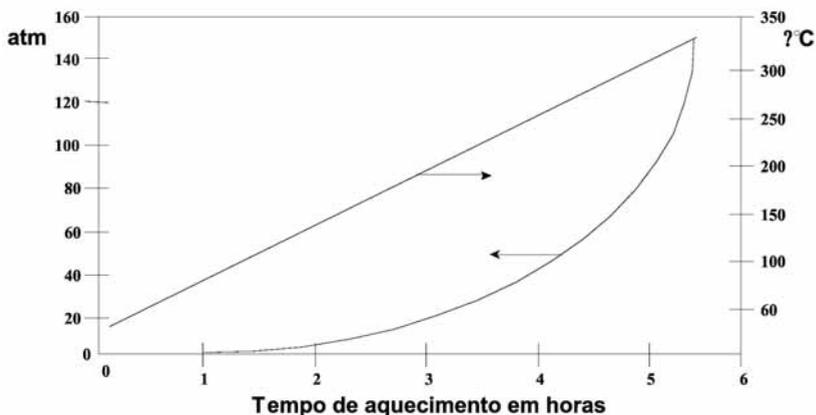


Gráfico 9.1 - Curvas de temperatura e pressão no processo de aquecimento de uma caldeira de médio porte e alta pressão

Os tubos da caldeira estarão todos cheios de água nesta fase, já que não há ainda geração de vapor. Os tubos do superaquecedor, entretanto, estão recebendo calor sem circulação de vapor internamente e, portanto, sujeitos à temperatura da parede elevada. Para prevenir danos nos tubos do superaquecedor, com mais razão, impõe-se o aquecimento inicial mais cuidadoso. Para proteção do superaquecedor, de acordo com o fabricante, podem-se manter abertas as válvulas de saída até a caldeira entrar em linha, quando já existe um suficiente fluxo interno de vapor para "resfriar" os tubos, mantendo-os dentro de uma faixa de temperatura tolerável pelo material. Assim, para a proteção do superaquecedor, na partida se desvia inicialmente o vapor para a atmosfera, com a finalidade de proteger os tubos. Também permanecem abertos os suspiros do tubulão e drenos da linha de saída de vapor, para ajudar na eliminação do ar, prover fluxo de vapor para seu aquecimento e purgar o condensado formado. Deverão ser fechados quando a pressão atingir 1 a 2 kgf/cm² e o fluxo estável de vapor estiver estabelecido, indicando que todo o ar foi expelido do tambor.

No caso de uma instalação simples de vapor, com uma caldeira, a válvula principal da caldeira pode ser estrangulada para aquecer e pressurizar a linha de vapor, antes de a caldeira atingir a pressão normal de operação. Quando a caldeira está conectada produzindo vapor, a bomba de água de alimentação pode ser ativada, e o controle de nível de água do tambor pode ser colocado em automático.

9.3 Procedimentos de parada

Em função das condições que determinam a parada, há, essencialmente, dois modos básicos de apagamento de caldeira: parada normal e parada de emergência. Este último tipo de parada acontece quando causada pelo sistema de intertravamento ou, mesmo, quando acionado manualmente (sistema de TRIP), de modo a preservar o equipamento e o pessoal de danos, devido a alguma disfunção na própria caldeira ou no restante do sistema. Este assunto será analisado no item 9.5. Procedimentos em situações de emergência.

9.3.1 Parada normal

Ocorre quando não há premência de tempo, como é o caso de uma parada por final de turno de serviço ou no caso de uma caldeira maior, para manutenção geral no período previsto em lei. Conforme o contexto operacional da caldeira que está sendo apagada, podem se dar dois casos.

No primeiro caso, admite-se que a caldeira é a única ou a última alimentando um consumidor qualquer. Evidentemente, há necessidade de haver uma parada conjunta, implicando um perfeito entrosamento entre o produtor e o consumidor de vapor. Se a geração for reduzida muito rapidamente, poderá acarretar em emergência para o processo, que se vê privado de uma fonte energética. Ocorrendo o inverso, se o consumidor bloquear seu consumo rapidamente, poderão ocorrer descontrole da combustão, abertura da válvula de segurança e até mesmo vir a se configurar uma parada de emergência, com risco de danos ao equipamento.

No segundo caso, supondo haver outra caldeira suprindo o processo, a parada terá que ser feita respeitando-se a velocidade de absorção de carga da outra caldeira, evitando que se configure também uma situação de emergência. Em ambos os casos, já que não há urgência de tempo, a parada poderá ser planejada previamente, de modo a haver conhecimento por todos os envolvidos, incluindo-se aí também o consumidor. No caso de grandes caldeiras, a distribuição do pessoal nos postos de trabalho é da maior importância. É preciso garantir que cada função seja desempenhada por pessoal qualificado e que seja mantido informado da evolução da manobra passo a passo. Não se deve permitir treinamento de pessoas sem supervisão individual nessas ocasiões. De outro lado, com a devida supervisão, trata-se de excelente oportunidade para o treinamento operacional.

Após essas considerações preliminares, pode-se iniciar a manobra de apagamento, começando-se pela redução gradual de carga. Fazer uma sopragem de fuligem e prosseguir

a redução de carga, passando-se os controles de combustão para manual e apagando-se os queimadores, um a um, à medida que a pressão nos mesmos começa a ficar muito baixa. Os controles de nível e temperatura normalmente precisam ser passados para manual quando a carga da caldeira for menor que 20% da nominal. Às vezes, este limite é superior a 30%, dependendo das características de estanqueidade das válvulas de controle, que, após certo tempo, podem apresentar erosão ou acumular resíduos na sede e, portanto, impedindo sua atuação em baixas cargas.

Os queimadores deverão ser bloqueados e, principalmente, na linha de gás, deve-se observar se não há pressão residual após o fechamento da válvula de fechamento rápido (*shutt-off*) que possa levar a vazamento de combustível para dentro da fornalha. Deve-se manter uma pequena vazão de ar de purga até a confirmação de que não há presença de combustíveis na câmara (usualmente, 15 minutos a 30% da vazão nominal). No caso de caldeiras com paredes de refratários, a vazão deve ser a mínima possível, para evitar danos aos refratários e tensões inadmissíveis nas partes sob pressão.

Após estas operações, deve-se isolar completamente a caldeira do restante do sistema e aguardar a unidade resfriar manualmente. Quando a pressão no tubulão chegar a 1,5 ou 2 kgf/cm², deve-se abrir os suspiros do tambor para prevenir a formação de vácuo na caldeira. Se a caldeira necessitar ser drenada, isto deverá ser feito após a pressão ter sido reduzida a zero. Se a caldeira não for drenada, é recomendado que o nível de água seja mantida (nível operacional ou pouco menos) durante o processo de redução de pressão. Se a caldeira for mantida fria por longo tempo, recomenda-se avaliar procedimentos específicos de manutenção para este caso.

9.3.2 Parada em situação de emergência

Uma situação de emergência que possa determinar uma parada da caldeira requer sempre mais habilidade, conhecimento, rapidez de ações e decisões em relação a uma parada normal. Como toda condição anormal, ela pode ser encarada como uma prova para o operador e o pessoal de supervisão, que têm de lidar diretamente com o equipamento defeituoso. É necessário agir rapidamente para contornar o problema e, por vezes, uma ação incorreta tem o efeito de agravar o problema ou dificultar uma posterior ação de manutenção.

É importante lembrar que paradas de emergência não podem ser planejadas com antecedência, por serem imprevisíveis, entretanto podem ser reduzidas a um mínimo pelo estudo cuidadoso dos vários aspectos envolvidos, como treinamento do pessoal, manuten-

ção adequada e controle das variáveis operacionais. Desta forma, pode-se observar que as ações devem envolver não só o pessoal de operação, mas toda a estrutura gerencial que possua uma parte da responsabilidade para a realização de uma operação confiável.

Portanto, é necessário pensar antes, seguindo uma determinada técnica, sobre como evitar emergências e sobre como lidar com elas, caso ocorram. Várias técnicas estão disponíveis no momento para esse tipo de trabalho e são designadas genericamente como análise de riscos, estando disponíveis na literatura especializada. Essas técnicas analisam um sistema qualquer sob os diversos aspectos de confiabilidade de cada um de seus componentes, englobando todas as fontes possíveis de problemas, incluindo aqueles oriundos de fabricação dos componentes, montagem, operação, manutenção, vida útil, etc.

A aplicação de uma análise adequada é recomendada para cada caso específico de caldeira. Os possíveis modos de falha e as correspondentes ações preventivas se tornarão claras, podendo ser planejadas previamente.

Apenas para servir de exemplo, apresentam-se a seguir alguns tipos de emergência mais comuns e as ações mais importantes a serem tomadas.

Perdas de nível de água

A perda de nível é uma das emergências mais graves para uma caldeira. Confirmada a posição do nível pelo visor local do tubulão em um valor inferior ao nível mínimo, a caldeira deve ser apagada imediatamente. A temperatura dos tubos é mantida em um nível seguro pela presença de líquido dentro deles e a queda do nível de água no tubulão indica uma situação insegura, por perda desse líquido. Sem a proteção líquida, eles podem se romper, agravando a perda. Também pode ocorrer o oposto: a ruptura de um tubo, por exemplo, devido à corrosão, pode levar à perda de nível e, portanto, à necessidade do apagamento. Caldeiras grandes mais modernas já dispõem de dispositivos de apagamento automático em caso de perda de nível. Observar freqüentemente o nível é um dos hábitos que os operadores de caldeiras devem desenvolver.

Aumento anormal de nível de água

Nível anormalmente alto implica necessariamente arraste de líquido para o superaquecedor, dessuperaquecedor e consumidores do processo. O controle de temperatura é perdido, passando o vapor para a condição de saturação, sobrecarregando o sistema de purgadores, que não são dimensionados para estas condições. Podem ocorrer aríetes

hidráulicos violentos e, caso o vapor úmido atinja turbinas, usualmente, inicia-se um intenso processo de erosão das palhetas. Nos casos mais graves pode ocorrer ruptura da carcaça, com graves riscos ao pessoal e aos equipamentos próximos.

Explosão de fornalha

Está sempre relacionada à presença de combustível e de ar dentro da caldeira em determinadas proporções e, também, à presença de uma fonte de ignição. Esses três fatores – combustível, ar e temperatura - podem ocorrer simultaneamente, devido à deficiência na purga, vazamentos através de válvulas defeituosas, demora na ignição durante o acendimento, etc. Também ocorre, embora mais raramente, durante a operação normal quando na queima de combustíveis líquidos, há o apagamento parcial dos queimadores por deficiência na atomização. Uma vez ocorrida a explosão, deve ser acionado o *trip* de emergência com o corte de todo o suprimento de combustível. Deverá ser mantido, caso seja possível, o insuflamento de ar pelos ventiladores até que o sistema de combustível possa ser totalmente bloqueado pelo campo e seja confirmada a ausência de vazamentos para dentro da fornalha. A palavra *explosão* pode denotar, a princípio, destruição total da caldeira, mas nem sempre isso ocorre. Existem casos em que os danos são leves, restringindo-se ao estufamento da chaparia externa e queda de parte dos refratários, podendo a caldeira voltar a operar por mais algum tempo, após uma rigorosa inspeção e efetuados os reparos necessários.

Rompimento de tubo

Pode ocorrer rompimento de tubo devido a corrosão externa ou interna, superaquecimento, tensões anormais ou defeitos de fabricação, montagem e manutenção. O rompimento é, em geral, constatado pela vazão de água, que se apresenta bem maior que a vazão de vapor. A água excedente, despejada no interior da caldeira, é parcial ou totalmente vaporizada e sai pela chaminé, cuja fumaça se apresenta esbranquiçada. Na impossibilidade de controlar o nível do tubulão, a caldeira deverá ser apagada em emergência. Caso o rompimento se dê em tubo de fornalha, poderá ocorrer apagamento de queimadores, gerando condições de explosividade e agravando o problema. Após o bloqueio dos queimadores, deve-se efetuar normalmente a purga e não alimentar a caldeira até a solução do problema.

Trip de emergência dos combustíveis

Normalmente, existe intertravamento, que bloqueia os combustíveis por falta de ar de

combustão. Certas caldeiras também dispõem de corte total por falha de chama, detectado por sensores de chama que monitoram cada um dos queimadores. Trata-se de uma emergência “segura”, já que os combustíveis foram cortados, restando a preocupação com a sobrecarga com as demais caldeiras ou parada do processo. Devem ser pesquisados defeitos no sistema de intertravamento, falta de energia e ar de instrumentos, fatores que provocam este tipo de pane.

Perda rápida de carga

Se não for descoberta a causa de imediato, recomenda-se bloquear logo os combustíveis. Normalmente, pode ocorrer este tipo de problema devido a grave vazamento de vapor no trecho anterior ao ponto de medição, problemas de combustão, falta de ar para combustão ou abertura de válvula de segurança.

Falta de ar de instrumentos

Embora, atualmente, a maioria dos instrumentos e sistemas de controle de geradores de vapor seja alimentada eletricamente, ainda são numerosas as caldeiras que empregam instrumentação a ar comprimido, cuja falta provoca uma pane generalizada nos controles. Em geral, o projeto da instrumentação segue normas de segurança no sentido de que com falta de suprimento as válvulas de combustíveis (controle e corte) fechem, apagando a caldeira. É importante lembrar que em algumas caldeiras vários instrumentos de painel recebem seu sinal por via pneumática e, no caso de falha, geram evidentemente leituras totalmente falsas. A caldeira deverá ser apagada diretamente pelo operador, com atenção direta para a indicação de nível no visor do tubulão (única confiável nesse caso) e alimentação de água manual. Se a pane for geral, o processo também vai parar em emergência, podendo gerar complicações adicionais.

Emergências no aquecedor de ar rotativo

O pré-aquecedor de ar rotativo pode ser objeto de vários tipos de ocorrências. Incêndio, obstruções, desbalanceamentos e imobilização são os mais comuns. Normalmente, a caldeira não pode operar com aquecedor de ar imóvel, conforme orientação dos fabricantes. Desbalanceamentos ocorrem por corrosão das colméias e obstruções são geralmente provocadas por resíduos de combustíveis e fuligem. Esses dois tipos de pane, entretanto, não são normalmente graves, por evoluírem lentamente. O problema mais perigoso é o incêndio, que destrói rapidamente o pré-aquecedor. O contínuo depósito de fuligem e outros produtos combustíveis, aliado a altas temperaturas em presença de ar,

constituem as principais causas de incêndio. A temperatura de saída dos gases subirá rapidamente, sendo um dos indicativos mais importantes, e por isso deve ser monitorada continuamente. Máxima atenção deve ser dada à qualidade de queima, para evitar esse problema. A extinção do incêndio se faz mediante parada da caldeira, apagando-a, e do ventilador e da injeção de vapor, pelo sistema de limpeza de fuligem (ramonador) ou injeção de água através de bocais específicos.

Retrocesso de chama

Os chamados *retrocessos de chama* são instabilidades importantes que ocorrem em caldeiras a combustível líquido quando a pressão dentro da fornalha excede, momentaneamente, a pressão da sala de caldeira ou a pressão do duplo invólucro nas caldeiras que o têm. São causados por: a) explosão de vapor de óleo ou gás resultante da vaporização do combustível em mistura com ar dentro de duplo invólucro ou chaminés; ou b) queda de pressão do duplo invólucro, devido a um vazamento ou à parada de um ventilador de tiragem forçada. A ocasião mais provável para ocorrer um retrocesso é durante o acendimento ou a tentativa de reacender um maçarico, com o calor da fornalha. Assim, as seguintes precauções devem ser observadas para se evitar a ocorrência de retrocessos, que podem causar danos permanentes na caldeiras:

- Não se deve permitir o acúmulo de óleo na fornalha. Todo óleo que, eventualmente, se acumulou no chão da fornalha deve ser retirado, e a fornalha deve ser completamente ventilada (purgada) antes de acender.
- As válvulas dos maçaricos devem ser mantidas sempre em boas condições de vedação para impedir o vazamento para dentro das fornalhas.
- Nunca se deve reacender um maçarico usando calor de paredes incandescentes. Para este propósito existe o ignitor.
- Evitar a produção de fumaça branca, qualquer que seja sua origem, pois pode haver a formação de misturas explosivas de fuligem ou gases em presença de grandes quantidades de excesso de ar.

9.4 Roteiro de vistoria diária

Um roteiro de vistoria diária raramente poderá ser estabelecido de forma genérica sem o conhecimento das condições nas quais a caldeira ou caldeiras operaram. Existem critérios diferentes para caldeiras com regimes de operação contínua, de operação alter-

nada ou de operação emergencial. Ainda há que se considerar o tipo de caldeira da instalação. Contudo, apenas para orientação, apresenta-se a seguir uma folha de inspeção que poderá ser adaptada a cada caso específico.

OPERAÇÃO	TEMPO (HORAS)					
	PADRÃO FUNCIONAMENTO	1	2	3	4	5
I - SISTEMA DE COMBUSTÃO IA – Compressor: Nível de óleo Pressão dear Refrigeração Temperatura	normal 0,8 atm normal normal					
IB – Ventilador: Temperatura dos mancais do ventilador Folga das correias do ventilador Rolamentos (estado geral)	normal normal normal					
IC – Bomba de óleo: Temperatura dos mancais da bomba de óleo combustível. (APF ou BPF) Redutor (estado geral) e nível de óleo (até 1/4 de engrenagem conduzidas)	normal normal					
ID – Circuito de óleo: Temperatura do óleo combustível (BPF) Pressão do óleo combustível	110°C 2 atm					
IE – Ignição: Pressão do óleo diesel do piloto	8 atm					

OPERAÇÃO	TEMPO (HORAS)					
	PADRÃO FUNCIONAMENTO	1	2	3	4	5
II – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA						
Funcionamento da bomba d'água	normal					
Situação da gaxeta da bomba d'água	normal					
Temperatura da água de alimentação no tanque de condensado	90 °C					
Indicador de nível d'água e alarme	normal					
Descarga da coluna de nível	sim					
Descarga de fundo (conferir indicação do tratamento d'água)	sim					
III – COMANDO AUTOMÁTICO						
Pressão máxima de trabalho	8 atm					
Diferencial de pressão para modulação	0,4 – 1 atm					
Funcionamento do foto-resistor	normal					
V – DIVERSOS						
Lubrificação geral	normal					
Temperatura dos motores	normal					
Temperatura dos gases na chaminé	250°C					
Descarga da válvula de segurança	sim					

10 Eficiência e Medidas de Economia em Sistemas de Vapor

A eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Como perdas sempre significam maiores custos, busca-se constantemente minimizar estes valores de energia perdida procurando-se trabalhar com equipamentos de alto rendimento e manter a eficiência em um nível máximo. Desta maneira, a determinação do valor da eficiência é de relevante importância. Neste capítulo serão analisados os métodos para o cálculo de eficiência em geradores de vapor e fornos, apresentando a formulação básica envolvida.

10.1 Eficiência térmica de geradores de vapor

A eficiência térmica, de maneira genérica, relacionando um benefício energético com o consumo de energia associado, pode ser dada por

$$\eta = \frac{\dot{Q}_\eta}{\dot{Q}_f}, \quad (10.1)$$

em que:

η - eficiência térmica;

\dot{Q}_η - calor útil; e

\dot{Q}_f - calor fornecido pelo combustível.

Considerando que os valores de calor fornecido e útil são diretamente proporcionais à vazão em massa do combustível utilizado e que a diferença entre estes valores indica a perda de energia sistema, pode-se reescrever a equação (9.1) como:

$$\eta = \frac{q_\eta}{q_f} \quad (10.2)$$

ou, então, como:

$$\eta = 1 - \frac{p}{q_f}, \quad (10.3)$$

em que:

q_u - energia útil por unidade de combustível;

q_f - energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível; e

p - energia perdida por unidade de combustível.

O valor de q_f pode ser considerado, de maneira bastante correta, como sendo igual ao poder calorífico do combustível, já apresentado no capítulo anterior. Desta maneira, percebe-se que o valor da eficiência varia dependendo de qual valor adota-se para o poder calorífico: o superior ou o inferior. Utilizando o poder calorífico superior, obtém-se um valor de eficiência menor do que quando se utiliza poder calorífico inferior. Isto se deve ao fato de o poder calorífico superior incluir a energia utilizada na vaporização da água.

Partindo dessas considerações iniciais, e atendendo às expressões 10.2 e 10.3, a eficiência térmica em geradores de vapor é calculada de duas maneiras distintas: o método direto e o método indireto, apresentados adiante. Vale observar que como o método direto trabalha com números de maior magnitude frente ao denominador, pode resultar maior dispersão dos resultados de eficiência para um dado nível de desvio na instrumentação utilizada para as medições. Assim, o método indireto pode ser eventualmente mais simples e apresentar resultados mais precisos.

10.2 Cálculo da eficiência pelo método direto

A eficiência pelo método direto é dada pelo quociente entre a energia produzida pela caldeira na forma de vapor e o consumo de energia do combustível. A energia do vapor pode ser definida pelo produto entre a vazão em massa de vapor e o ganho de entalpia observado na água, em sua transformação de água de alimentação em vapor. Assim:

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_a)}{\dot{m}_c PC}, \quad (10.4)$$

em que as variáveis envolvidas são mostradas a seguir, com suas unidades usuais:

- η_{MD} - eficiência pelo método direto, [-];
- \dot{m}_v - vazão mássica de vapor, [kg/s];
- h_v - entalpia do vapor produzido, [kJ/kg];
- h_a - entalpia da água de entrada, [kJ/kg];
- \dot{m}_c - vazão mássica de combustível, [kg/s]; e
- PC - poder calorífico do combustível, [kJ/kg].

Para conhecer esses valores para o vapor, são necessárias diversas medições. No caso de vapor superaquecido, devem ser medidas a vazão, a temperatura e a pressão do vapor produzido, utilizando-se essas últimas duas variáveis para a determinação da entalpia do vapor. Quando a caldeira a ser estudada produz vapor saturado, pode ser assumido que o vapor produzido é vapor saturado seco ou com título elevado, bastando a leitura da pressão para se inferir sua entalpia. Entretanto, principalmente em caldeiras com separação deficiente de líquidos no tubulão, a formação de espuma, ou outro problema de arrasto, pode estar sendo produzido vapor com título relativamente baixo, e apenas a medida de pressão do vapor não é suficiente para avaliar sua entalpia. Nesse último caso é necessário fazer uma medição de título do vapor, que pode ser conseguida por meio de um calorímetro de estrangulamento, expandindo-se o vapor até a pressão atmosférica em condições adiabáticas e avaliando-se sua entalpia no estado superaquecido. As medições da vazão de combustível podem ser relativamente simples no caso de gases e líquidos combustíveis, mas apresentam considerável dificuldade no caso de combustível sólido, como lenha.

Quando a medida de algumas dessas variáveis for imprecisa ou não puder ser obtida, como frequentemente ocorre, o valor da eficiência pode ser obtido pelo método indireto.

10.3 Cálculo da eficiência pelo método indireto

O método indireto utiliza a análise das perdas do gerador de vapor para obter o valor da eficiência. Também neste método são necessárias várias medidas, que, da mesma maneira, podem estar associadas a erros. Entretanto, como a maior parcela de perda está relacionada com o fluxo de gases pela chaminé, que pode ser medido de maneira precisa, o valor da eficiência pode ser obtido com razoável precisão.

A perda total de calor é obtida pela soma das perdas por transferência de calor e pelas perdas associadas aos fluxos que deixam a caldeira, com exceção, naturalmente, do fluxo de vapor. Desta maneira, a perda total é composta, basicamente, pelas seguintes parcelas, que serão vistas a seguir: perdas pela chaminé, perdas por radiação e convecção perdas por purgas, perdas associadas à temperatura das cinzas e perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas. O procedimento a seguir foi adaptado de uma rotina de cálculo sugerida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

10.3.1 Perdas pela chaminé

As perdas de calor do combustível pelos gases da chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais: associadas aos gases secos formados na combustão; e as associadas ao vapor presente na chaminé. A perda associada à entalpia dos componentes do gás seco gerado na combustão pode ser representada por:

$$P_{GS} = (m_{CO_2} c_{P_{CO_2}} + m_{SO_2} c_{P_{SO_2}} + m_{O_2} c_{P_{O_2}} + m_{N_2} c_{P_{N_2}})(T_{CH} - T_R), \quad (10.5)$$

em que:

m_i - massa do componente i formado na combustão, ([kg/kg] de comb.);

c_{pi} - calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref} , [kJ/kg.°C];

T_{CH} - temperatura dos gases na chaminé, [°C]; e

T_R - temperatura de referência adotada, [°C].

Em cálculos práticos e considerando que grande parte dos gases é constituída de nitrogênio atmosférico, a equação 10.5 pode ser substituída, sem incorrer em grandes erros, por:

$$P_{GS} = m_{GS} * c_{Par}(T_{CH} - T_{Ref}) \quad (10.6)$$

em que:

m_{GS} - vazão mássica dos gases de combustão, ([kg/kg] de comb.); e

c_{par} - calor específico médio do ar entre T_{CH} e T_R , [kJ/kg °C].

As perdas associadas à presença de vapor na chaminé podem ser calculadas por:

$$P_v = m_p * c_{pv}(T_{CH} - T_{Ref}) + m'_v * h_{lv}, \quad (10.7)$$

em que:

m_p - vazão mássica total de vapor, ([kg/kg] de comb.);

c_{pv} - calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{Ref} [kJ/kg °C];

m'_v - vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível, ([kg/kg] de comb.); e

h_{lv} - entalpia de vaporização da água na entalpia de referencia, [kJ/kg].

Também fazem parte da perda pela chaminé as perdas associadas à presença de monóxido de carbono e fuligem nos gases de combustão, as quais, na maioria das vezes, não são significativas, pois os geradores de vapor devem operar com um excesso de ar mínimo que assegure a combustão completa do combustível, como visto no capítulo anterior.

10.3.2 Perdas por radiação e convecção

A determinação das perdas por radiação e convecção pelo costado das caldeiras é, geralmente, complexa, devido às diversas e complexas medições necessárias para sua obtenção. De maneira geral, adota-se que estas perdas variam entre 1% a 4% da energia fornecida.

10.3.3 Perdas por purgas

Esta parcela está relacionada à perda de energia causada pelo fluxo de água retirada na purga, realizada para manter a concentração de sais na água dentro da caldeira em níveis toleráveis, sendo dada por:

$$p_p = m_p * c_{pa} (T_p - T_{Ref}) \quad (10.8)$$

em que:

m_p - vazão média de água purgada, ([kg/kg] de comb.);

c_{pa} - calor específico da água no estado líquido, [kJ/kg °C]; e

T_p - temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, [°C].

A purga pode ser realizada de forma contínua ou periódica. Durante as medições para determinar a eficiência de uma caldeira, a purga é interrompida, exatamente para permitir uma adequada avaliação dos valores de desempenho especificamente associados aos processos de combustão e transferência de calor.

10.3.4 Perdas associadas à temperatura das cinzas

Na queima de combustíveis sólidos, a saída de cinzas implica perdas que, a rigor, devem ser calculadas para cada caso específico. Na prática, este valor pode ser estimado pela equação 10.9 (em kJ/kg de combustível), na qual o valor 1.170 representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas.

$$P_{TC} = m_R * 1170 \quad (10.9)$$

em que:

m_R - massa de cinza obtida pela massa de combustível, ([kg/kg] de comb.)

10.3.5 Perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas

Para obter-se o valor exato desta perda seria necessário realizar um ensaio para determinar o poder calorífico da mistura de cinzas e de combustível não convertido. Como na maioria das vezes isto não é possível, costuma-se realizar a análise da quantidade de carbono sem queimar nas cinzas, que é determinada de maneira mais simples. A partir deste valor, estima-se esta perda (em kJ/kg de combustível) pela equação 10.10, na qual o valor 33.780 representa um fator de correção.

$$P_{CC} = m_c * 33780 \quad (10.10)$$

em que;

m_c - massa de carbono presente nas cinzas, ([kg/kg] de comb.)

10.3.6 Perdas totais

Após a determinação das perdas, a eficiência pelo método indireto pode ser dada por:

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f} \quad (10.11)$$

Esta equação pode também ser apresentada da seguinte forma:

$$\eta_{MI} = 1 - \left[K + \frac{\lambda (a/c + 1) c_p * (T_{CH} - T_{Ref})}{PC} \right], \quad (10.12)$$

em que:

K - representa a somatória de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé, correspondendo tipicamente à menor parcela das perdas;

λ - coeficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real fornecido com o ar teórico requerido pelo combustível; e

PC - poder calorífico do combustível.

10.4 Medidas de economia em sistemas de vapor

De modo geral, as medidas de economia de energia podem ser consideradas em três grandes grupos, relacionadas, respectivamente, ao projeto dos sistemas, a sua operação regular e a sua manutenção periódica, configurando situações em que cabem distintos procedimentos e podem ser esperados diferentes resultados. Sempre deve ser lembrado que um bom desempenho energético e a redução das perdas, fazem sentido dentro de condicionantes de viabilidade econômica; ou seja, os custos associados à economia de energia devem ser cobertos com a energia economizada. A eficiência não é um objetivo em si mesma, e apenas se justifica pelos benefícios econômicos que pode trazer. Quanto mais caro for o combustível empregado, maior será a capacidade das caldeiras e mais in-

tensa será a utilização, medida em horas anuais de funcionamento. Também, mais interessante passam a ser as medidas de economia de energia.

10.4.1 Economia na geração de vapor

A produção de vapor baseia-se sempre na produção de calor; em geral, a partir da queima de algum combustível, com a geração de gases quentes, e da cessão da energia térmica desses gases para a água contida na caldeira. Usar bem energia nessa etapa consiste, portanto, em manter em níveis mínimos as perdas na combustão e a adequada transferência de calor para a água, como mostrado nas medidas sugeridas a seguir:

Projeto

As caldeiras têm no momento de sua concepção, desenho e construção a efetiva oportunidade de incorporar equipamentos e dispositivos para assegurar um baixo nível de perdas, que sempre buscam reduzir a energia que é carregada com os gases de combustão para a chaminé. Os sistemas de combustão devem ser capazes de permitir uma queima da forma mais completa possível e com o mínimo teor de ar em excesso, o que significa prover uma adequada mistura com o ar e a prévia preparação do combustível, mediante seu aquecimento e pressurização (no caso de líquidos e gases). Estes aspectos foram comentados e equacionados no Capítulo 5.

A transferência do calor para água depende das superfícies expostas ao fluxo de gases quentes, que podem receber a energia térmica por radiação e convecção, mecanismos que, por sua vez, são afetados pela temperatura e velocidade dos gases. Entretanto, considerando que o calor para ser transferido necessita de uma diferença de temperaturas e como a água no interior da caldeira e o vapor produzido estão a temperaturas relativamente altas, torna-se impossível reduzir muito a temperatura dos produtos de combustão. É por esse motivo que em caldeiras muito simples os gases saem a valores elevados na chaminé, com as perdas correspondentes também elevadas. Em caldeiras de maior porte podem ser adotados sistemas auxiliares de recuperação de calor, como os economizadores (pré-aquecedores de água) e os pré-aquecedores de ar, que aproveitam o calor ainda disponível e melhoram a eficiência da caldeira, conforme ilustra o Gráfico 10.1.

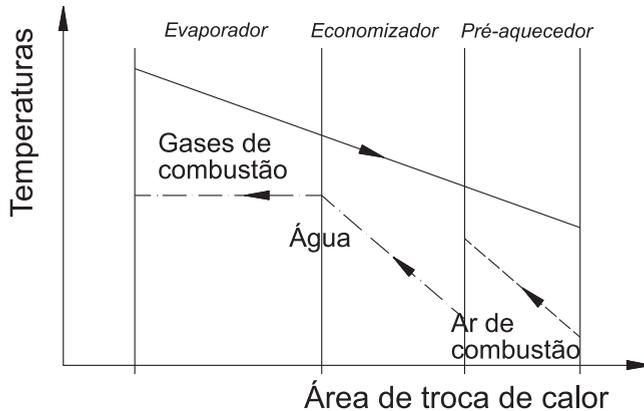


Gráfico 10.1 - Recuperação de calor em caldeiras

Uma caldeira simples, sem recuperação de calor, pode ter sua eficiência em torno de 70%, podendo atingir níveis superiores a 90% quando incorporando recuperadores de calor, que passam a ser quase imprescindíveis em equipamentos maiores e quando produzindo vapor sob temperaturas mais altas. Entretanto, a redução da temperatura dos produtos de combustão é limitada pelo ponto de orvalho desses gases, a partir do qual ocorre a condensação de líquidos na chaminé, o que deve ser evitado, particularmente para o caso de combustíveis contendo enxofre em sua composição. Nesse caso, os vapores sulfurosos reagem com a água e formam ácido sulfúrico, bastante corrosivo, em temperaturas superiores a 170 °C.

Também relacionado ao projeto, o adequado isolamento do costado e das paredes da caldeira é importante para reduzir as perdas de calor a níveis toleráveis. Em geral, os fabricantes provêm seus equipamentos atendendo a estes aspectos.

Operação e manutenção

Estas atividades devem ser conduzidas de modo a manter, dentro do possível, as condições estabelecidas no projeto da caldeira, ou seja, uma boa combustão e uma adequada transferência de calor para a água. Neste sentido, é relevante considerar que:

- um combustível líquido deve ser queimado na temperatura correta, para que possa ser adequadamente pulverizado e bem queimado;

- um combustível sólido deve ser queimado na granulometria (ou nas dimensões) correta e com a umidade o mais baixa possível;
- o excesso de ar é um ponto chave a ter em conta: excessos inferiores ao recomendado levam à queima incompleta, ao passo que valores de excesso de ar além do necessário, acarretam perdas adicionais de calor arrastado pela chaminé; e
- a redução das trocas térmicas entre os gases e a água pode ser determinada pelo progressivo acúmulo de depósitos sobre as superfícies metálicas no lado dos gases e da água e pode ser indicada pela elevação da temperatura na base da chaminé.

Limpezas periódicas das superfícies expostas aos produtos de combustão são importantes. No caso de caldeiras aquotubulares, geralmente, são disponíveis sistemas de sopragem de vapor (ramonagem), que permitem, durante a operação, retirar os depósitos de fuligem que se formam sobre os tubos. Para as caldeiras flamatubulares, estas operações de limpeza somente podem ser realizadas com a caldeira parada. Usualmente, são realizadas com hastes e escovas de aço, com periodicidade que depende do tipo de combustível e da eficiência esperada. Mais difíceis e, portanto, menos freqüentes são as atividades de limpeza de superfícies aletadas ou em radiadores de pré-aquecedores de ar, não obstante também poderem formar depósitos às vezes problemáticos.

Da mesma forma que o isolamento da caldeira, devem ser objeto de atenção eventuais as perdas de gases quentes e as entradas falsas de ar, que não ajudam a melhorar o desempenho da combustão, além de reduzirem a temperatura dos gases e a eficiência da caldeira. Em sistemas com tiragem balanceada, um recurso para diminuir este tipo de perda consiste em assegurar uma pressão equilibrada ou levemente superior à atmosférica na fornalha.

O tratamento de água para geradores de vapor é, evidentemente, de grande importância, exatamente por minimizar a formação de depósitos sobre o lado da água das caldeiras, o que, além das implicações de segurança, acarreta sensíveis reduções de desempenho. Uma incrustação de apenas 0,6 mm de espessura sobre um tubo de caldeira pode acarretar uma elevação da temperatura dos gases de cerca de 200 °C, com evidentes efeitos sobre o metal do tubo e perda de eficiência da ordem de 20%.

Outra forma de considerar o efeito da qualidade da água sobre o desempenho consiste em observar a direta correlação da purga de fundo necessária para manter o nível de sais dissolvidos no interior da caldeira dentro de valores aceitáveis. O volume de água a ser retirado periodicamente da caldeira depende da concentração máxima admitida de sais (função do

tipo de caldeira e da pressão do vapor produzido) e da qualidade da água de alimentação. Usualmente, estas perdas não são tomadas em conta nas medições de eficiência de caldeiras, mas podem ser importantes e afetar o consumo de combustível em condições reais.

Ainda que a medição do excesso de ar eventualmente não possa ser efetuada com a frequência desejada, sobretudo em sistemas a vapor de menor capacidade e com caldeiras pequenas, a medição da temperatura dos gases na chaminé é simples e deve ser realizada rotineiramente, servindo como um bom indicador da eficiência da combustão e das trocas de calor na caldeira.

10.4.2 Economia na distribuição de vapor

A principal perda de energia na distribuição de vapor desde a caldeira até os pontos de utilização ocorre por transferência de calor para o ambiente e deve ser minimizada mediante o adequado isolamento das linhas de vapor. Em linhas de vapor saturado, a situação mais comum, a energia térmica perdida ocasiona a formação de condensado, que deve ser retirado por meio de purgadores. Na distribuição de vapor, quando existem perdas além do tolerável, o volume de condensado é alto e, muitas vezes, acarreta funcionamento ineficiente do sistema de vapor e um gasto adicional de combustível.

Projeto

Na fase de concepção e desenho do sistema de distribuição de vapor, de acordo com a demanda a ser atendida e a perda de carga admissível, estabelecem-se os diâmetros dos tubos e se especificam os purgadores, definindo-se seu posicionamento. Uma condensação excessiva aumenta as perdas de cargas e reduz a entalpia do vapor efetivamente disponibilizado aos consumidores. Um bom projeto de distribuição de vapor deve prever margens de segurança para que a operação ocorra sempre de forma eficiente, inclusive nos inevitáveis transientes durante a partida dos sistemas. Por exemplo, no aquecimento, uma linha de 4" de diâmetro e comprimento de 20 m pode condensar cerca de 0,5 l/s (1800 kg/h), um valor normalmente acima do especificado para os purgadores instalados nas linhas.

Operação e manutenção

Em ambas as atividades, mas particularmente na manutenção das redes de distribuição de vapor, deve-se priorizar a conservação do isolamento, fundamental para manter a condensação do vapor em valores toleráveis e o perfeito funcionamento dos purgadores de vapor. Inspeções rotineiras dos purgadores são medidas de grande impacto no de-

sempenho energético de sistemas de vapor, já que, freqüentemente, estes dispositivos podem apresentar defeitos que implicam perdas de vapor. Um orifício de 1/4", aproximadamente 6 mm, frente a uma pressão diferencial de 40 bar descarrega cerca de 500 kg/h de vapor; ou seja, orifícios podem causar perdas consideráveis.

Um aspecto relevante a se ter em conta é que o vapor condensado ao ser liberado para a atmosfera é parcialmente evaporado e pode induzir a que, equivocadamente, se considere que o purgador está dando passagem a vapor. Para orientar corretamente as inspeções dos purgadores, os fabricantes disponibilizam instrumentos específicos para este fim, em geral, baseados no acompanhamento da temperatura do condensado a montante do purgador, que em condições normais deve ser alguns graus Celsius inferior à temperatura do vapor. Embora, naturalmente, a recuperação do condensado e seu uso na alimentação da caldeira em um circuito fechado sejam bastante interessantes do ponto de vista de economia de energia e da racionalização do uso de água tratada, é importante observar que nessas condições as perdas de vapor em purgadores são menos detectáveis e podem ser quase invisíveis.

Como as linhas de vapor, muitas vezes, são extensas e podem ser bastante ramificadas, é interessante observar se, efetivamente, estão sendo usados todos os ramais de distribuição de vapor ou se, eventualmente, algum poderia ser bloqueado, implicando evidente economia de energia associada ao vapor condensado desnecessariamente nesse ramal sem utilização.

10.4.3 Economia na utilização de vapor

A função típica do vapor em uma grande gama de aplicações é fornecer calor em condições controladas e limpas. O vapor fornecido se condensa, entrega uma quantidade de energia térmica considerável por unidade de massa e sob taxas elevadas, e sai do equipamento. Como nos casos anteriores, o projeto deve ser efetuado de forma a considerar uma baixa perda térmica para o ambiente e prever margens de segurança para assegurar o desempenho esperado.

Para manter a eficiência energética na utilização do vapor, a limpeza das superfícies de condensação, a adequada drenagem do condensado e a permanente retirada do ar, este último aspecto torna-se relevante porque o vapor sempre arrasta algum ar, uma fração gasosa incondensável que se não for retirada se acumula progressivamente no equipamento e pode diminuir de modo sensível a área efetiva de troca de calor, afetando seu desempenho e reduzindo a eficiência energética do sistema. Diversos tipos de purgado-

res permitem não apenas a retirada do condensado como também a eliminação de ar em linhas e dispositivos de uso de vapor. Contudo, como para uma mesma temperatura a densidade do ar é menor que a do vapor, o ar se acumula sempre nas partes mais elevadas dos equipamentos, enquanto o condensado naturalmente se deposita nas partes mais baixas.

11 Sistema de Vapor e Meio Ambiente

11.1 O conceito de poluição do ar

Os impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis no meio aéreo derivam, regra geral, da deposição e dispersão de poluentes atmosféricos.

A Lei 6.938/81, art. 3º, III, define poluição como “a degradação da qualidade ambiental resultante de atividade que direta ou indiretamente:

- prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- afetem desfavoravelmente a biota; e
- afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente”;

De acordo com a ABNT, pela NBR 8969, de julho de 1985, poluição do ar significa “a presença de um ou mais poluentes atmosféricos” e poluente atmosférico, “toda e qualquer forma de matéria e/ou energia que, segundo suas características, concentração e tempo de permanência no ar, possa causar ou venha a causar danos à saúde, aos materiais, à fauna e a flora e seja prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade. O mesmo significado que contaminante atmosférico”.

11.2 Produtos emitidos no processo de combustão

Os produtos resultantes do processo de combustão são:

- gases completamente isentos de cheiro e odoríferos;
- poeiras (*dust*) constituídas por partículas com dimensões dentro da faixa de 1 a 500 μm ; e
- fuligem (*soot*) resultante de produtos com dimensões bem reduzidas, inferiores a 1 μm , mas que aglomerados atingem 20, 30 até 70 μm .

Os gases contêm na sua mistura teores variados de dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor da água, podendo apresentar, sob condições excepcionais, o monóxido de carbono (CO), ácido sulfídrico (H_2S), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros.

O dióxido de enxofre, por exemplo, resulta do enxofre contido em alguns combustíveis, produto da reação $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$, que, sob certas condições, transforma-se em anidrido sulfúrico (SO_3) e em ácido sulfúrico (que tem alto grau de agressividade), se houver a presença de água nos gases de combustão do processo de queima de combustíveis hidrocarbonetados.

Os produtos de combustão do licor negro, oriundo do processo de fabricação da celulose, respondem pela emissão de complexos compostos de enxofre de odores altamente penetrantes. Encontram-se nestes gases, além dos acima citados, os compostos dimetil monossulfato (CH_3)₂S, dimetil bisulfato (CH_3)₂-S₂, e metil mercaptanas CH_3 -SH. Os gases contaminantes do tipo NO_x resultam da queima de alguns combustíveis que contêm em sua constituição compostos de nitrogênio, encontrados particularmente em alguns carvões minerais, xistos e turfas.

As poeiras provêm da elutrição de particulados (arraste de finos), representados por sais minerais (cinzas) contidos nos combustíveis, os quais são arrastados ao longo de todo o trajeto da caldeira na corrente gasosa resultante da combustão e não podem ser evitados por serem inerentes ao próprio processo. Cargas térmicas das câmaras de combustão inadequadas também podem contribuir para o aumento deste arraste. Os combustíveis sólidos respondem pela maior quantidade de elutriados, por conterem em sua composição maiores teores de cinza.

Os combustíveis líquidos e gasosos, quando submetido a queima com processos adequados, não deveriam exalar nenhum particulado. Combustíveis sólidos se comportam de forma distinta, dependendo das quantidades elutriadas empregadas ao variar o processo de queima e a sua umidade. A falta de ar de combustão é outro fator negativo responsável por considerável aumento de elutriados.

O Gráfico 11.1 exibe uma avaliação de comportamento de queima de um óleo combustível quanto à quantidade de particulados formados para dois princípios de queima: simples pulverização mecânica e pulverização mecânica com vapor auxiliar, para excessos de ar da ordem de 20%.

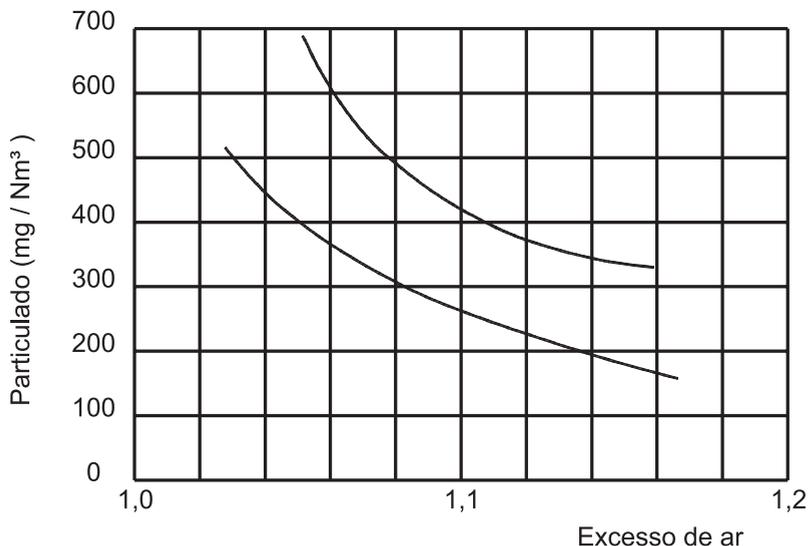


Gráfico 11.1 - Quantidade de particulados formados na queima de óleo combustível BPF. (A queima com vapor auxiliar diminui a formação de particulados)

É de grande interesse tecnológico a determinação tanto qualitativa quanto quantitativa das dispersões nos efluentes gasosos das chaminés. O procedimento descrito a seguir compreende uma série de técnicas, que constituem a chamada "amostragem em chaminé", cujo resultado fornece valioso subsídio para a obtenção de parâmetros operacionais da caldeira. Essas medidas visam:

- constatar se os produtos emitidos pela chaminé considerados poluentes ultrapassam o limite máximo permitido pelos órgãos responsáveis pela fiscalização e controle ambiental. Para cada região há um padrão de emissão;
- determinar, qualitativa e quantitativamente, os valores extremos emitidos num determinado intervalo de tempo;
- identificar a fonte produtora das emissões poluentes;
- selecionar aparelhagem adequada para reter as emanações poluentes que ultrapassam os Padrões de Emissões; e
- avaliar a eficiência das instalações captadoras existentes.

11.2.1 Concentração dos produtos emitidos

Com o intuito de estabelecer técnicas de separação, torna-se imprescindível conhecer os teores de cada componente do sistema disperso de sólidos, líquidos e gases nocivos em mistura com o gás inerte. A diversidade de comportamento dos inúmeros projetos de geradores de vapor, seja quando a sua própria concepção construtiva ou pelo processo de combustão, impede a formulação de uma regra geral no que diz respeito à quantidade dos produtos arrastados até a saída da chaminé.

Há unidades geradoras de vapor que já possuem, embutidos no circuito dos gases de combustão, meios para reter, separar e extrair até 70% das partículas sólidas que acompanham os fluidos, evitando concentrações mais elevadas na saída para a atmosfera. São os projetos que vão além da definição térmica do processo e englobam outros recursos de fluidodinâmica, com vista a estender mais benefícios ao meio ambiente. Alguns destes projetos conforme a legislação até prescindem de aparelhos adicionais para a coleta dos elutriados. Quando tal deixa de ser viável, estas instalações adicionais são de custos menores e apresentam maiores eficiências de captação.

Geradores de combustíveis sólidos adequadamente projetados, operando em condições satisfatórias, não deveriam arrastar para a chaminé quantias superiores a 1,2 g de particulados por normal metro cúbico de gases. Um equipamento de captação associado a esta unidade com eficiência de 93% liberaria para a atmosfera apenas 77 mg/Nm³, valor aceitável pela legislação brasileira nos locais mais exigentes. Têm-se, entretanto, registrado valores bem superiores a este.

Algumas unidades examinadas pelo autor, queimando lenha em toras, apresentam 3 a 6 g/Nm³ de material arrastado; a lenha picada queimando sobre suporte chegou a registrar 5 g/Nm³ e o bagaço de cana até 6 g/Nm³. As concentrações mais elevadas foram localizadas nas instalações de queima de lenha em caldeira tipo flamotubular, reconhecidamente não indicadas para o emprego de combustível sólido. A composição dos produtos gasosos e sua participação nas emanações atmosféricas determinam-se com analisadores.

11.2.2 Determinação das concentrações dos gases

O equipamento usado na determinação dos produtos gasosos emanados pelas chaminés denomina-se *Orsat*, que tem como princípio de operação a absorção seletiva dos diferentes componentes gasosos que compõem a mistura mediante a passagem e o borbulhamento em soluções de produtos químicos previamente dosados.

A medição do volume de cada componente se faz na base seca, porquanto a amostra colhida a partir de uma tomada introduzida no canal dos gases passa através de um borbulhador com água, que condensa toda a umidade existente na mistura. Dessa forma, o aparelho permite avaliar a composição volumétrica do CO , CO_2 , O_2 , N_2 , por diferença, mas não estabelece a quantidade de água existente na amostra, cujo conhecimento tem importância na avaliação final dos resultados da “Amostragem em Chaminé”.

A Figura 11.1 exhibe o aparelho mais divulgado na determinação da umidade do gás, cujo componente ativo é a sílica gel.

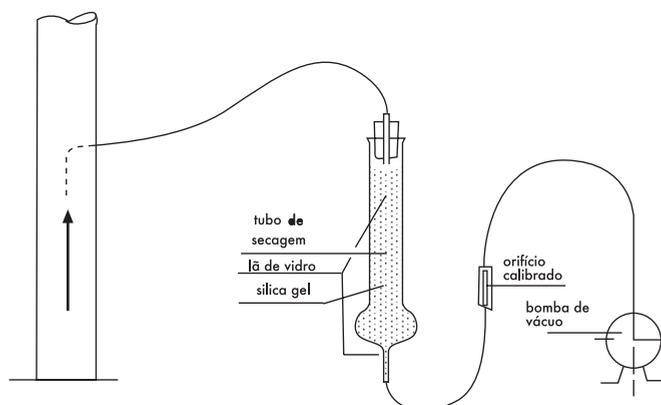
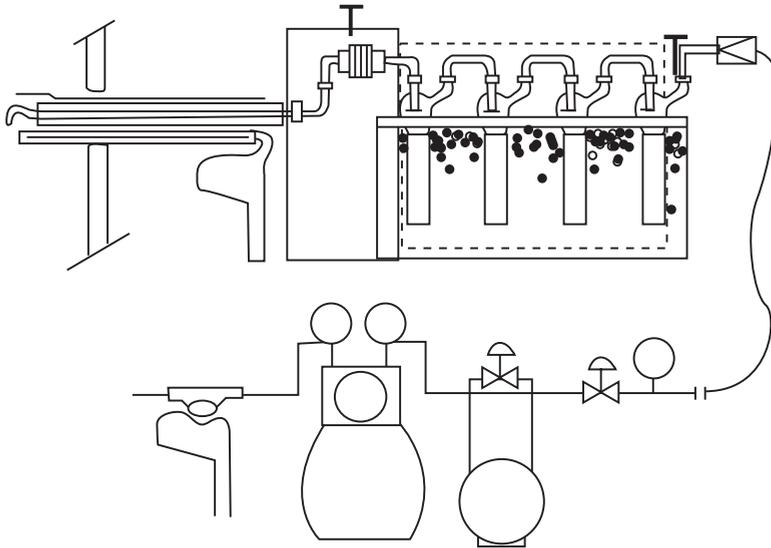


Figura 11.1 - Aparelhagem para a determinação da umidade da amostra de gases colhida em uma chaminé
Fonte: Pêra (1990)

11.2.3 Determinação das concentrações dos particulados

A determinação da concentração de particulados também se faz mediante a coleta de uma amostra retirada do conduto pelo qual circula o gás de combustão. O aparelho, conhecido como “sonda”, em essência, consta de um ciclone, responsável pela coleta de determinada porcentagem de partículas, e de um filtro, que retém as demais. Estes componentes são interligados por condutos que partem do interior do canal de gases e determinam num aparelho que promove a sucção desta amostra gasosa.

Um aparelho mais aperfeiçoado corresponde ao aplicado no chamado *método 5* da USEPA (Fig. 11.2).



- 1 - sonda aquecida com a coleta dos gases;
- 2 - sistemas de filtro e ciclone aquecidos;
- 3 - conjunto de borbulhadores para a absorção de gases e umidade;
- 4 - bomba de vácuo;
- 5 - medidor de volume de gases secos;
- 6 - medidor de vazão com orifício e manômetro inclinado;
- 7 - nomógrafo para estabelecer a vazão com velocidade isocinética.

Figura 11.2 - Aparelhagem usada pelo Método 5, segundo USPEA

Fonte: Pêra (1990)

A obtenção de uma mostra representativa requer um procedimento adequado, sob pena de se obter resultados totalmente falsos. A primeira exigência é o conhecimento da composição química dos gases efluentes e de sua umidade. O vapor de água, sempre presente na mistura, pode provocar a formação de produtos corrosivos e até prejudicar o andamento do ensaio. Segue-se como condição importante assegurar, durante ensaio, junto ao ponto de sucção da amostra, a presença da denominada *velocidade isocinética*. Conta-se esta condição quando a velocidade de escoamento do gás no interior do bocal se aproxima daquela existente no próprio gás que escoar próximo à tomada da amostra.

Deixando de existir esta condição, as linhas de fluxo da corrente gasosa sofrem permutações na vizinhança do ponto de sucção da amostra, provocando alteração da composição e das partículas em suspensão. A Figura 11.3 ilustra o fenômeno de perturbação

provocado pela velocidade dos fluidos. Além dessa condição, a sonda deve ser instalada o mais afastado possível de qualquer zona de turbulência existente no tubo de escoamento, longe, portanto, das singularidades, tais como: mudanças de direções, estrangulamentos ou expansões. É preciso levar em conta, ainda, que as partículas dispersas no gás não se distribuem uniformemente em toda a secção de escoamento, determinando coletas de amostras em vários pontos do plano selecionado.

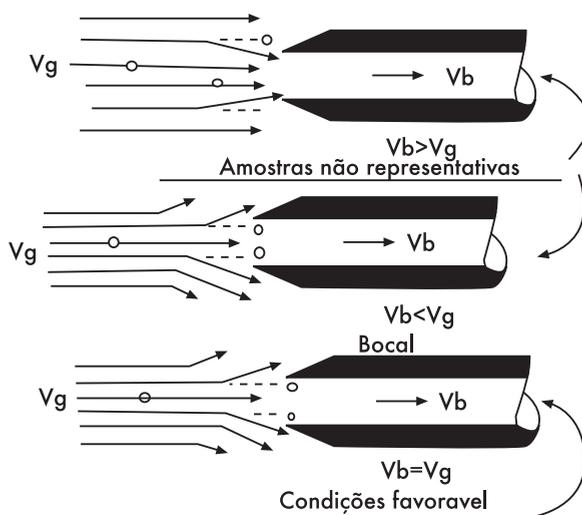


Figura 11.3 - Esquema gráfico de definição de velocidade isométrica

Fonte: Pêra (1990)

Existem dois métodos básicos para se efetuar estas medições:

- *Método de determinação por incrementos* – Procede-se de maneira a obter várias amostras separadas, segundo uma programação de distribuição dos pontos de coleta. Encerrado o trabalho de campo, estas amostras são analisadas quanto ao peso e à composição gravimétrica e destes resultados, formulados os valores médios.
- *Método cumulativo* – Recolhe-se todo o material em uma única vez e determinam-se seus valores. Acresce citar, que os resultados definitivos resultam da média de repetidas tomadas de amostra, a fim de assegurar os estabelecimentos de valores que exprimem, com a melhor aproximação possível, o fato que se deseja detectar.

Institutos, órgãos filiados ao governo e estabelecimento técnicos têm se preocupado com a formulação de técnicas adequadas na determinação das concentrações dos elutri-

ados. Uma dessas técnicas foi proposta pelo British Standart Institution (BSI), mediante o uso de aparelhagem esquematizada na Figura 11.5.

Do equipamento da BSI constam os seguintes componentes:

- 1 - Bocal
- 2 - Sonda
- 3 - Separador
- 4 - Medidor de vazão
- 5 - Válvula de controle de vazão
- 6 - Exaustor
- 7 e 8 - Termômetros
- 9 - Medidor de umidade do gás
- 10 e 11 - Medidor de pressão estática
- 12 e 13 - Medidor de pressão diferencial
- 14 - Tubo de Pitot

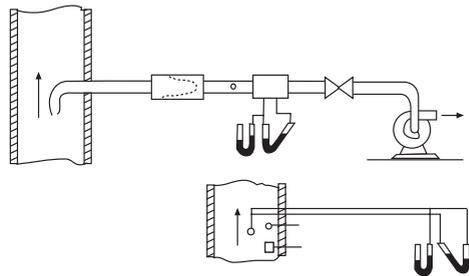


Figura 11.4 - Esquema da aparelhagem da BSI

Fonte: Pêra (1990)

Uma das peculiaridades do método é a eficiência alcançada pelo filtro separador de finos, capaz de reter partículas de dimensões bem ínfimas, conforme mostra a Tabela 11.1.

TABELA 11.1 - TABELA DE EFICIÊNCIA DE COLETA DE FINOS

DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS (μM)	EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO (%)
5,0 ou maiores	99
5,0 até 1,0	98
1,0 até 0,5	96
0,5 ou menores	90

Outro método reconhecido foi proposto pela ASME, cujo princípio de funcionamento se aproxima daquele da BSI, diferindo apenas na maneira de distribuir os pontos de tomadas de amostra ao longo de toda a secção de escoamento dos fluidos.

Para detectar fuligem desprendida na queima do óleo combustível, com o intuito de quantificar o material elutriado, emprega-se a técnica do filtro de lã de sílica. Os gases de combustão, mantidos à temperatura superior ao ponto de orvalho, atravessam inicialmente um filtro aferido, para a seguir atravessar um condensador com torre de separação de eventuais resíduos não coletados.

O escoamento, desde a tomada no conduto, é garantido por uma bomba de vácuo, antes da qual um medidor de gás seco e um rotâmetro registram os dados nos medidores, permitindo quantificar a massa específica de fuligem por metro cúbico de gases medidos nas condições normais de pressão e temperatura.

11.3 Processos para redução de poluentes gasosos

Dentre os gases resultantes da combustão, são consideráveis poluentes aqueles que não são reciclados por algum processo natural no meio ambiente, dentre os quais se destacam o monóxido de carbono, o gás sulfúrico e os óxidos de nitrogênio (SO_x , NO_x). Para a eliminação destes efluentes contaminadores da atmosfera, a tecnologia deve intervir não só mediante a formulação de aperfeiçoamento dos processos de queima, como também no estabelecimento de técnicas de separação adequadas. A propósito da primeira meta, no que se refere à queima de combustíveis para a geração de vapor, o texto já enfatizou os recursos disponíveis para tal.

No que tange à separação, são colocadas à disposição da solução do problema três técnicas;

- Adsorção;
- Absorção; e
- oxidação catalítica.

A absorção é o método mais divulgado, devido à velocidade da reação e à eficiência da aparelhagem, apresentando como desvantagem única a dificuldade na regeneração do absorvente. A dolomita, por exemplo, tem sido empregada como veículo de absorção do SO_2 . Unidades geradoras de vapor queimando óleo com enxofre têm recebido, diretamente na Câmara de Combustão, uma fina suspensão deste mineral a 300 mesh. Consta-se, de fato, uma absorção de até 90% do SO_2 formado, resultado este que atinge 99%, se o circuito do gás for associado um captador. A dolomita é um mineral que contém na sua composição carbonatos de cálcio magnésio, sais estes que reagem facilmente com os

gases sulfurosos na presença do vapor e da água, formando os respectivos sulfatos.

O esquema apresentado na Figura 11.5 corresponde à solução proposta pela Combustion Engineering para uma unidade destinada a queima de carvão mineral em pó. O carvão e a dolomita são adicionados simultaneamente no moinho que prepara o combustível para a queima.

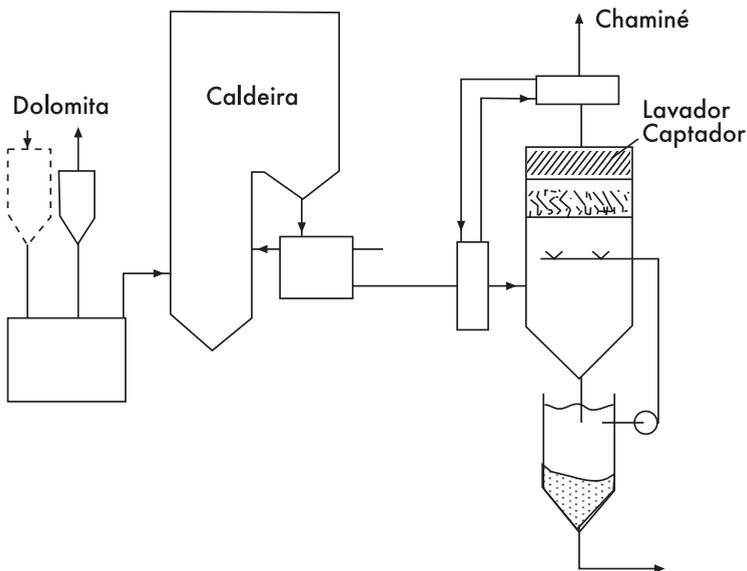


Figura 11.5 - Aplicação da dolomita como agente na redução de emissões de SO_2
Fonte: Pêra (1990)

Construtores japoneses propuseram a injeção de óxidos de manganês na corrente gasosa antes do seu ingresso no pré-aquecedor de ar.

O processo catalítico, para formar o sulfato de amônio, com o SO_2 dos gases, deve-se ao Dr. Kiyoura. O método consiste, inicialmente, na transformação do SO_2 , em SO_3 , por meio da ação catalítica do pentóxido de vanádio em regiões com temperaturas de 380-450°C, imediatamente convertido em ácido sulfúrico. Posteriormente, na própria corrente gasosa mantida à temperatura de 220/260°C, pulveriza-se água amoniacal, produto este que gera o sulfato de amônio. Dessa forma, obtém-se com o processo um produto final de valor comercial que promove um retorno do investimento capaz de justificar a inversão. O processo se verifica a temperaturas elevadas para eliminar o risco da corrosão, sendo o sulfato facilmente separado com captadores a seco, instalados no final da caldeira (Fig. 11.6).

Outros processos têm sido desenvolvidos na Inglaterra, França e Alemanha, todos preocupados com a associação dos benefícios proporcionados com a eliminação da poluição e o retorno do investimento, porquanto tem sido este último um dos óbices mais recalcitrantes para vencer o aniquilamento do habitat.

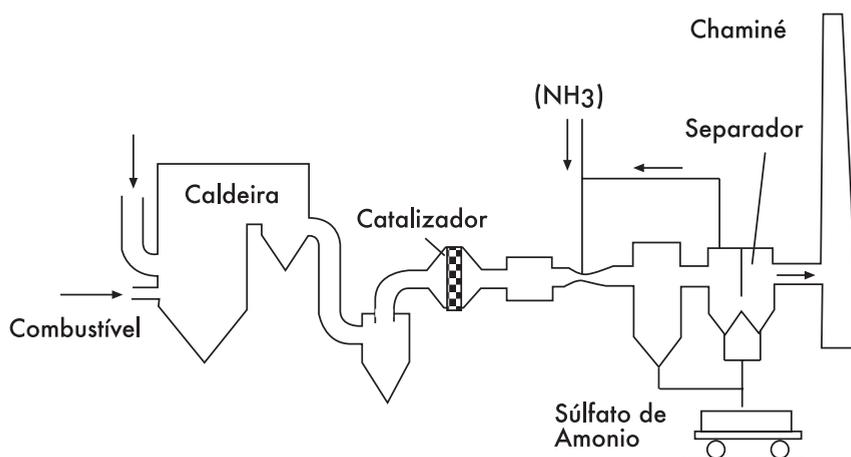


Figura 11.6 - Processo Kiyoura catalítico
Fonte: Pêra (1990)

11.4 Métodos para separação de particulados

Com base em alguns princípios da fluidodinâmica e da ionização dos gases, podem-se agrupar todos os aparelhos em dois grupos: os separadores a seco; e os separadores a úmido.

11.4.1 Separação a seco

- Aparelhos que separam as partículas, com base na força da gravidade.

Cada partícula incorpora uma determinada massa, que, pela força da gravidade, tende a cair. As partículas que possuem massas reduzidas sofrem influência do fluxo e resistência do meio gasoso, e continuam sendo arrastadas pelos gases. Portanto, um aparelho que tenha por base este princípio de funcionamento tende a separar as partículas maiores e a exibir rendimentos bastante modestos. Para atenuar o efeito de elutriação, os gases atravessam estes aparelhos com velocidades muito baixas, da ordem de 1 a 2 m/s, fazendo com que as câmaras sejam construções de grandes dimensões. Mesmo nessas condições a eficiência não ultrapassa 10/50%. A Figura 11.7 exhibe uma destas câmaras.

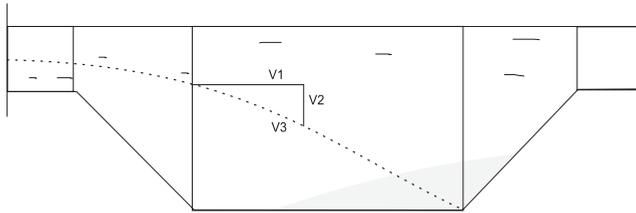


Figura 11.7 - Câmara de decantação

Fonte: Pêra (1990)

Admitindo como velocidade de entrada das partículas V_e e como, velocidade de sedimentação, V_s , a resultante V_r terá por valor:

$$V_r = \sqrt{V_e^2 + V_s^2} \quad (11.1)$$

A câmara deve ser projetada de forma a assegurar o ingresso das partículas no ponto mais elevado da mesma e a criar uma direção de queda com velocidade resultante que as projete no ponto de captação.

Embora a aparelhagem apresente a possibilidade de captação de partículas, sua limitação resulta da baixa eficiência, em torno de 45 a 55%, prestando-se na retenção de partículas no máximo de 50μ .

- Força centrífuga - Constitui outro recurso para concepção de aparelhos separadores, dentre os quais, o mais divulgado é o ciclone.

São impostos à corrente gasosa, impregnada de partículas, uma mudança de direção e um movimento rotatório no interior de um cilindro pela introdução tangencial dos fluidos. O percurso da partícula sofre uma ação conjunta da força da gravidade, da força de inércia de corrente gasosa e da força de inércia da própria partícula, promovendo a sua separação. Mediante esta tecnologia, separam-se até 90% das partículas, sendo arrastadas geralmente as dimensões inferiores a $10 \mu\text{m}$. A Figura 11.8 apresenta duas concepções de ciclones e a Figura 11.9 exhibe um multiciclone.

Dentre esses dois primeiros processos, ambos enquadrados nos separadores a seco, o último representa uma das soluções mais difundidas na captação de partículas, apresentando como desvantagem uma perda de carga elevada da ordem de 60 a 110 mmCA .

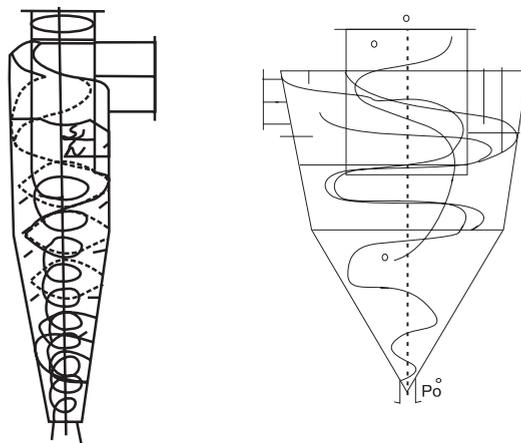


Figura 11.8 - Dois exemplos de ciclones separadores de poeira
Fonte: Pêra (1990)

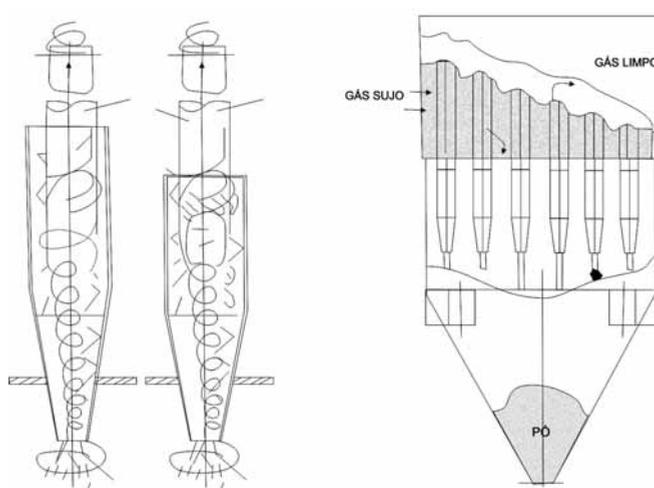


Figura 11.9 - Conjunto de um multiciclone

c) Aumento da eficiência da separação - A técnica desenvolveu os filtros com tecidos, também conhecidos por filtros de mangas, com resultados superiores aos primeiros, dado que retêm 99% das partículas do gás.

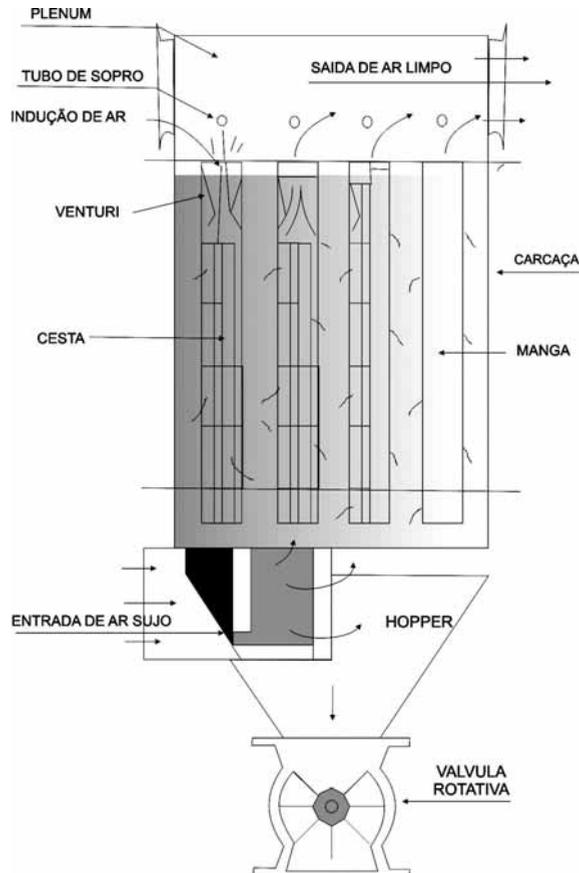


Figura 11.10 - Filtro de mangas completo, com seus acessórios de extração contínua das poeiras
Fonte: Pêra (1990)

As mangas são executadas com tecidos de algodão ou fibras sintéticas, inclusive com fibra de vidro, em conformidade com a temperatura e a composição química do gás.

O problema mais delicado nestes aparelhos está no material utilizado para a execução dos tecidos das mangas o qual, representado pela composição no custo de fabricação e pela participação considerável. Se a sua durabilidade for comprometida pelas condições de trabalho, com freqüência muito severas, a instalação de um filtro de manga deixa de ser viável, apesar de representar um excelente processo de captação.

- Substituição de filtro de manga - que responde pela captação a seco, com eficiência elevada, o filtro eletrostático. O aparelho consiste em uma câmara de passagem dos gases, onde se estabelece um campo de alta tensão elétrica, provocando a ionização pelos eletrodos componentes do campo. Graças a um processo mecânico de percussão periódica, as partículas presas aos eletrodos se desprendem e caem em coletores, que se incumbem da extração do material poluente.

As Figuras 11.11 e 11.12 constituem alguns exemplos destes aparelhos e acessórios.

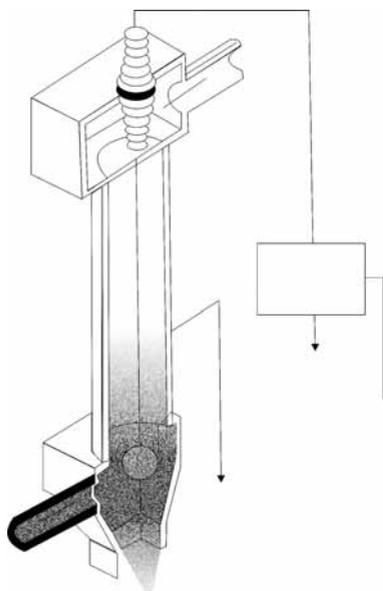


Figura 11.11 - Elemento básico de um precipitador eletrostático

Fonte: Pêra (1990)

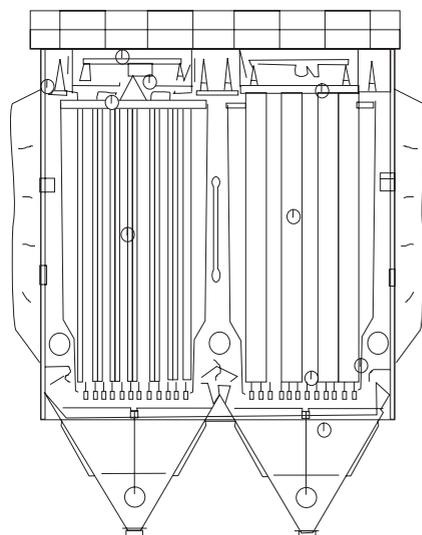


Figura 11.12 - Vista geral de um precipitador eletrostático da empresa Rothemühie

Fonte: Pêra (1990)

11.4.2 Separação a úmido

No segundo grupo de aparelhos, a técnica recorre à água para reter as partículas contidas nos gases. A série de aparelhos se denomina *captadores a úmido*, dentre eles: *ciclone lavador (Scrubber)*, o venturi, o ciclone com filtros ou com anéis de cerâmica e coletores de bolhas ou espuma, constituindo uma variedade apreciável de concepções construtivas.

Todos se baseiam no fato de a partícula sólida se agregar à gotícula de água, ou um lençol de água, separando-se da fase gasosa.

A eficiência dessas concepções varia de projeto para projeto, porém todas exibem valores superiores aos captadores ciclônicos.

No dimensionamento de qualquer tipo de aparelho de particulados importa conhecer não somente a concentração dos sólidos como também a sua classificação granulométrica. O conhecimento da distribuição dos tamanhos de partículas é de importância capital para a determinação da eficiência e, até, para a própria seleção do equipamento mais apropriado à separação.

A Tabela 11.2 fornece, a título de exemplo, o campo de aplicação das diferentes aparelhagens de captação. A eficiência de um aparelho separador é obtida pela relação entre a massa de particulado coletada e a massa total existente na corrente gasosa.

TABELA 11.2 - CAMPO DE APLICAÇÃO DOS DIFERENTES PRINCÍPIOS DE APARELHOS CAPTADORES DE PARTÍCULAS ELUTRIADAS COM OS GASES DE COMBUSTÃO.

TIPO DO EQUIPAMENTO	CAMPO DE APLICAÇÃO
Câmara de sedimentação	Coleta de partículas entre 100 e 150 μm
Ciclones de baixa perda de carga	Coleta de partículas entre 50 e 60 μm
Ciclones de alta eficiência	Coleta de partículas até 10 μm
Lavadores a úmido	Coleta de partículas até 5 μm
Filtros de manga	Coleta de partículas até 1 μm
Precipitadores eletrostáticos	Coleta de partículas até 0,1 μm

A eficiência de coleta de cada uma dada dimensão, ou seja, de uma fração de massa total, também se estabelece da mesma forma. A distribuição das dimensões é expressa em porcentagem da massa de cada tamanho, as quais, para particulados grosseiros, admitem os métodos clássicos de medição como, por exemplo, a peneira mecânica.

Uma amostra aferida, coletada de conformidade com normas estabelecidas por órgãos técnicos, permite estabelecer a sua classificação granulométrica. De acordo com a malha da tela, obtêm-se os tamanhos das partículas. Quando os particulados exibem partículas de uma dezena de μm para baixo, os métodos simples de determinação das condições são impraticáveis. Inúmeros métodos são adotados para processar a classificação dos particulados, destacando-se:

- classificador de peneira mecânica;
- classificador por sedimentação em meio líquido;
- classificador por elutriação em cilindros verticais;
- classificador microscópio ótico;e
- classificador microscópio eletrônico.

A ordem na citação dos cinco métodos conhecidos respeita o grau de aperfeiçoamento e a capacidade de identificação das dimensões das partículas.

11.5 Sistema de tratamento de gases de combustão

Os combustíveis, ao se combinarem com o ar no processo de queima, produzem diversos gases, que podem ser prejudiciais ao ambiente e ao homem. Além disso, podem gerar finos e particulados. Por essas razões, os gases de combustão devem ser adequadamente tratados antes de serem lançados a atmosfera.

Para a redução dos particulados, são usados ciclones, multiclones e precipitadores eletrostáticos (Fig. 11.13). O tratamento dos gases é feito em torres de lavagem ou por processos químicos. É importante salientar que, preferencialmente, tanto os gases prejudiciais quanto o particulado devem ser reduzidos na sua geração, isto é, no momento da combustão. O tratamento posterior geralmente resulta em novos resíduos a serem tratados.

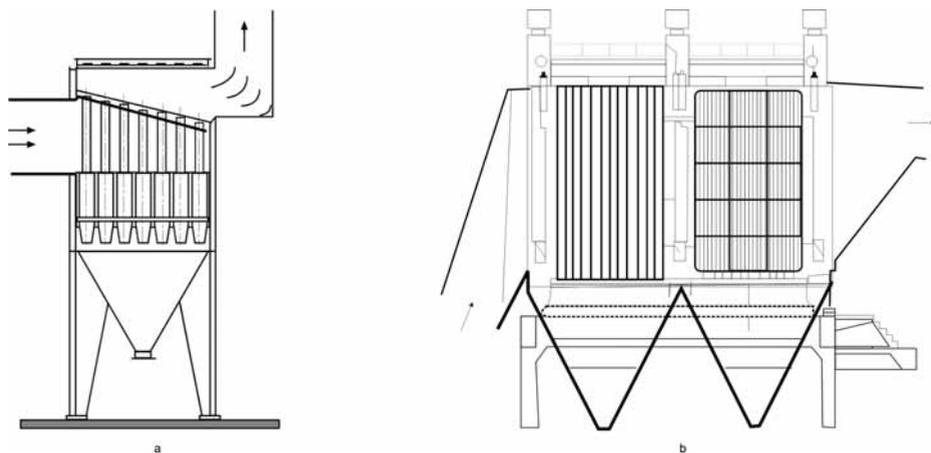


Figura 11.13 - Em a, um sistema de ciclones; e em b, um precipitador eletrostático.

12 Temas Econômicos

As decisões sobre investimentos passam, necessariamente, por uma análise de viabilidade econômica. Tais questões podem se apresentar de duas formas: ou deseja-se decidir sobre a escolha entre diferentes alternativas; ou deseja-se conhecer a viabilidade econômica de uma dada alternativa.

Por exemplo, deseja-se decidir entre a compra de uma caldeira a óleo ou a gás natural, ou sobre a viabilidade de permanecer com uma caldeira antiga por tempo.

Nestas análises, em geral, utilizam-se parâmetros econômicos que permitem traduzir a atratividade de um investimento. Dentre estes parâmetros, podem-se destacar o valor presente líquido, o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital. Para a execução de tais análises, procura-se moldar o problema real em uma forma padrão, um fluxo de caixa, o que permite aplicar certas equações e utilizar-se das considerações e limitações descritas a seguir.

12.1 Premissas

- O valor do dinheiro varia ao longo do tempo.
- Deve haver alternativas factíveis de investimentos.
- As alternativas podem ser representadas monetariamente.
- Somente as diferenças entre as alternativas são relevantes.
- Somente o presente e o futuro são importantes.
- Os juros são a remuneração do risco ou o custo do capital.

12.2 Critérios de aprovação de alternativas de investimento

- Financeiro - disponibilidade de recursos financeiros.
- Econômico - rentabilidade dos investimentos.

- Imponderáveis - parâmetros não mensuráveis monetariamente.

12.3 Matemática financeira

A matemática financeira se preocupa com o valor do dinheiro ao longo do tempo. É aplicada convertendo-se o valor do dinheiro em diferentes períodos para uma mesma data, a partir da aplicação de juros.

12.3.1 Juros simples

O conceito da taxa de juros procura exprimir o “valor do dinheiro no tempo”. Por exemplo, desprezada qualquer inflação, para um indivíduo mais vale receber mil reais hoje do que esperar para receber daqui a um ano. Esta é uma questão bastante intuitiva e individual, pois, na verdade, o quanto se estaria disposto a receber por esperar varia para cada pessoa.

Os juros correspondem ao valor obtido com a aplicação de um valor presente (P) durante um certo número de períodos (n), a uma taxa de juros (i). No caso, os juros simples são aqueles que incidem apenas sobre o capital inicial. São calculados pela equação apresentada a seguir.

$$\mathbf{J = P \cdot i \cdot n} \quad (12.1)$$

Considerando que a taxa de juros é um prêmio para que um indivíduo espere para receber o que lhe é devido, ela pode ser usada para relacionar o valor futuro F com o valor presente P. Assim, após n períodos de capitalização o valor reajustado do capital inicial, denominado valor futuro, é calculado por:

$$\mathbf{F = P(1 + i \cdot n)} \quad (12.2)$$

12.3.2 Juros compostos

Os juros compostos são aqueles que incidem sobre o capital próprio e sobre os juros do período anterior. Portanto, apenas no primeiro período eles são iguais aos juros simples. Ao final de n períodos, o valor futuro é calculado pela seguinte expressão:

$$F = P(1+i)^n \quad (12.3)$$

12.3.3 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa é uma maneira simplificada de se representar graficamente as receitas e as despesas de um projeto ao longo do tempo.

Nesta modelagem, tudo o que for ganho, benefício, receita e semelhantes é representado por uma seta apontando para cima. Da mesma forma, de outro lado, tudo o que for gasto, despesa, investimento, custos e outros é representado por uma seta para baixo, conforme ilustrado na Figura 12.1.

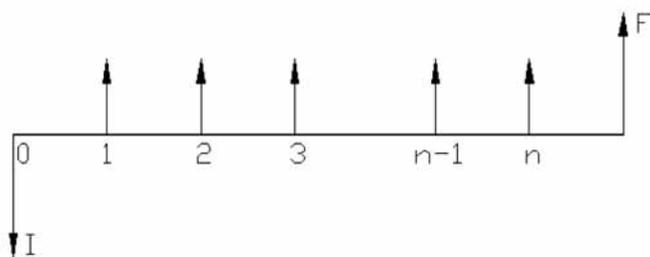


Figura 12.1 - Esquema de um fluxo de caixa.

A princípio, pode ser utilizada qualquer unidade de tempo. Análises anuais e mensais são as mais comuns, uma vez que a maturação destes projetos normalmente está inserida neste período de tempo.

Na prática, o número de períodos, muitas vezes, representa a vida útil de um equipamento, a vida contábil, o período de análise ou a duração do fluxo de caixa, como ocorre em projetos que envolvem períodos de concessão. Nestas análises, é importante que a taxa de juros esteja em conformidade com o período de tempo adotado.

Para o caso de se ter várias anuidades, o cálculo deve ser cumulativo. Seja, por exemplo, o seguinte fluxo de caixa:

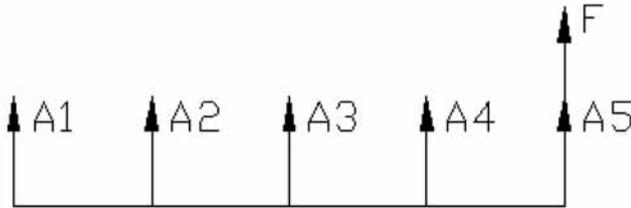


Figura 12.2 - Série uniforme

O valor figura será dado pela soma das contribuições de cada anuidade corrigida pela taxa de juros, da seguinte forma:

$$F = A_5 + A_4 \cdot (1+i) + A_3 \cdot (1+i)^2 + A_2 \cdot (1+i)^3 + A_1 \cdot (1+i)^4 \quad (12.4)$$

Se as anuidades e os intervalos de tempo forem iguais, caracterizando a chamada *série uniforme*, pode-se lançar mão da fórmula da soma dos elementos de uma progressão geométrica para se obter uma equação generalizada, no que resulta:

$$\frac{F}{A} = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (12.5)$$

É possível obter importantes relações entre A e P combinando-se as equações anteriores.:

12.3.4 Fator de recuperação de capital

$$\text{FRC}(i, n) \frac{A}{P} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (12.6)$$

12.3.5 Fator de valor presente

$$\text{FVP}(i, n) \frac{P}{A} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} \quad (12.7)$$

Em muitos casos, a série que se apresenta pode ser não uniforme. Um exemplo típico é a chamada *série gradiente*:

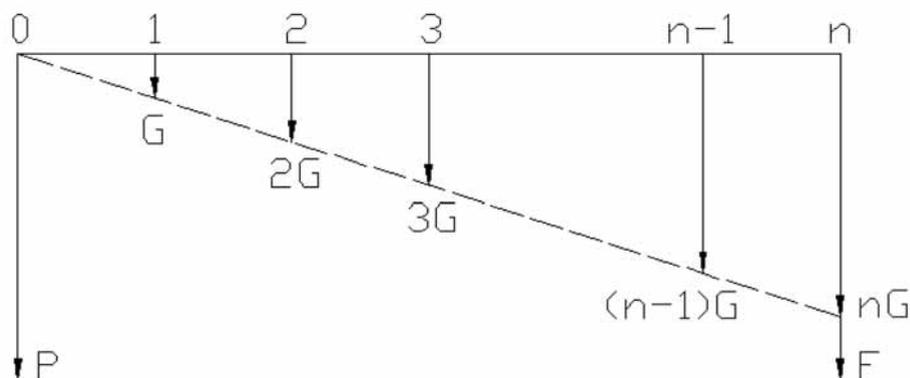


Figura 12.3 - Série gradiente.

Nestes casos, tem-se:

$$\frac{F}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2} \quad (12.8)$$

$$\frac{P}{G} = \frac{(1+i)^{n+1} - (1+n \cdot i + i)}{i^2 \cdot (1+i)^n} \quad (12.9)$$

12.4 Análise de alternativas de investimentos

Os critérios de tomada de decisão baseados em análise econômica utilizam-se das expressões deduzidas anteriormente. Serão apresentados os métodos do valor presente líquido (benefício líquido), do valor anual uniforme, do tempo de retorno de capital e da taxa interna de retorno. Naturalmente, as diversas técnicas apresentam certas vantagens e desvantagens quando comparadas entre si, devendo sempre ser aplicadas conhecendo as suas limitações.

12.4.1 Método do valor presente ou do benefício líquido

O método do valor presente líquido (PVL) é bastante interessante quando se deseja comparar alternativas mutuamente excludentes de modo que todos os benefícios e custos em seus diversos instantes no tempo sejam traduzidos para o presente. A alternativa que oferecer o maior valor presente líquido será, por este critério, a mais atraente.

É importante observar que, ao se fazer comparações entre alternativas, devem-se con-

siderar somente os aspectos que as diferenciam. Por exemplo, sejam duas alternativas de geração de vapor com tipos de caldeira diferentes que ofereçam a mesma produção: continuar com caldeira antiga de menor eficiência ou comprar uma nova, mais eficiente. Neste caso, os benefícios auferidos intrinsecamente com a produção de vapor não deverão ser considerados, posto que é o mesmo para as duas alternativas e serão, portanto, posteriormente cancelados. Somente a redução no custo com o consumo de combustível, decorrente do aumento da eficiência energética, deve ser considerado.

Neste critério, os fluxos devem ser trazidos para o presente, usando o fator de valor presente. É de fundamental importância, no entanto, que o período de análise seja o mesmo para as diversas alternativas. Mais adiante serão apresentadas técnicas adequadas para o estudo de casos com diferentes períodos de análise.

Pode-se agora introduzir o conceito de *custo de oportunidade*. O custo de oportunidade é um artifício que permite considerar vantagens tecnológicas ou benefícios oriundos de uma determinada alternativa em uma análise econômica. Por exemplo, suponha que se esteja analisando a compra de uma caldeira, e a escolha seja uma caldeira a óleo ou uma caldeira a gás natural. Sabe-se que, ao se utilizar o gás natural como combustível, tem-se grande benefício ambiental, devido à reduzida emissão de poluentes. Para considerar este benefício, pode-se, por exemplo, adicionar ao custo de investimento da outra alternativa o custo de tecnologias de redução de emissão de poluentes que iguale os níveis de emissão ao da caldeira a gás natural.

Sendo assim, fica evidenciada a importância de uma análise de sensibilidade. Esta deve fazer variar alguns parâmetros importantes, dentro de faixas relativamente estreitas, a fim de se verificar como se comporta o valor presente. Isto contribuirá sobremaneira na tomada de decisão. O conceito de análise de sensibilidade será apresentado posteriormente.

12.4.2 Método do valor anual líquido

O método do valor anual líquido (VAL) também é indicado para comparar alternativas mutuamente excludentes. A grande vantagem deste método é que permite analisar alternativas com vidas úteis diferentes lançando-se mão do conceito de *reposição contínua*. Ou seja, passada a vida útil do equipamento, ele será repostado por outro idêntico, sendo que isto irá ocorrer até que os períodos totais das alternativas se igualem.

Este critério trabalha com a distribuição de custos e de investimentos que estejam concentrados em determinado instante do tempo pelo fator de recuperação de capital. A alternativa que apresentar o valor uniforme mais atraente será a alternativa escolhida.

Uma questão interessante a ser observada neste critério, assim como no critério do valor presente líquido, é a influência da inflação. Embora esta seja uma variável de importante valor, pode-se desprezá-la nestas análises se for considerado que ela atua com a mesma intensidade sobre as duas alternativas. Como citado anteriormente, somente as variáveis que diferenciam as alternativas devem ser consideradas.

12.4.3 Método da taxa interna de retorno

Um critério que tem alcançado grande aplicabilidade na análise econômica é o da taxa interna de retorno (TIR), principalmente quando se analisa um projeto por si mesmo, com seus custos e benefícios. A TIR é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente; ou seja, é a taxa que torna nulo o valor presente líquido do projeto em um período de tempo estipulado.

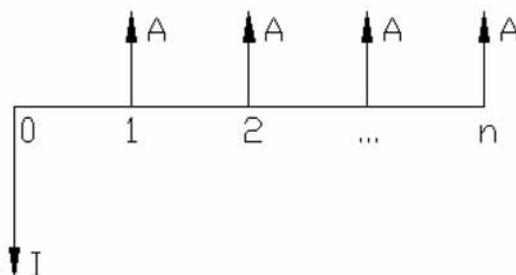


Figura 12.4 - Taxa interna de retorno.

Igualando o valor presente a zero, tem-se:

$$A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} - I = 0 \quad (12.10)$$

Nesta equação, I representa o valor do investimento. Não se consegue determinar algebricamente o valor da taxa interna de retorno (i), uma vez que esta é uma equação transcendental. A sua solução exige a aplicação de métodos numéricos, como o de Newton-Raphson, ou outro processo iterativo. Para o caso presente, a maneira mais fácil de encontrar a TIR é calculando o VPL para crescentes taxas de juros, marcando estes pontos em um gráfico. Após alguns pontos a curva VPL por (i) já é suficiente para se avaliar o ponto de VPL nulo, que corresponde à TIR. O Gráfico 12.1 ilustra o exposto.

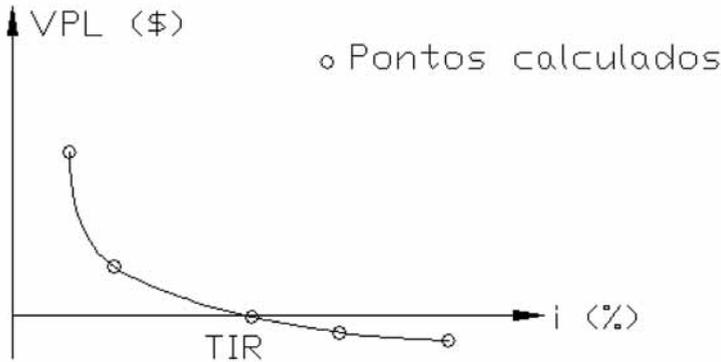


Gráfico 12.1 - Processo gráfico para o cálculo da TIR.

Quando a TIR for superior à taxa de juros considerada para o empreendimento, tem-se que o investimento é atrativo.

A análise comparativa entre dois empreendimentos pela TIR pode não ser recomendável. A justificativa para esta afirmação baseia-se no objetivo de se maximizar o lucro, sendo que este pode ser o VAL, que é a diferença entre o benefício total atual e custo total atual. Entretanto, pode-se ter um empreendimento cujo VAL é bem inferior e a relação entre o benefício total atual e o custo total atual ser bem mais elevada, resultando em maior TIR. Em termos práticos, por exemplo, no primeiro caso exige-se maior investimento, mas resulta num lucro maior, enquanto que o investimento é menor no segundo caso, resultando em menor lucro, mas para cada unidade monetária investida tem-se um retorno maior.

Outra maneira de se analisar a viabilidade do investimento consiste em comparar a TIR com a taxa mínima de atratividade (TMA).

A TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está auferindo ganhos financeiros, representando, portanto, a expectativa mínima de rentabilidade, sendo particular para cada investidor, uma vez que está associada à aversão ao risco. Apesar das contradições, pode-se definir que a TMA é aquela possível de ser obtida em aplicações correntes ao mínimo risco ou adotar o custo do capital mais o risco do investimento.

No primeiro caso, quando um investidor possui um capital e deseja aplicá-lo, evidentemente ele não vai fazê-lo em um projeto que possua uma taxa de rentabilidade menor

do que uma outra aplicação já existente no mercado e que apresenta risco inferior ao do projeto em questão. Já o segundo caso poderá ser esclarecido supondo-se que o capital a ser investido seja obtido no mercado a uma determinada taxa de juros. Considerando-se que o projeto possua um determinado risco, a taxa mínima de atratividade não deverá ser menor que o custo do capital adicionado ao risco de investimento. Note-se que o risco pode atuar tanto negativamente como positivamente sobre o projeto. Sendo assim, deve-se considerar a pior alternativa.

Uma análise que embute o conceito da TIR, tendo as mesmas limitações, é a de custo-benefício. Esta é, como explicita o nome, a relação entre o custo total atual, ou anual, pelo benefício total atual, ou anual. É bastante comum, em empreendimentos energéticos utilizar índices para a comparação entre investimentos ou simples acompanhamento, que são, na verdade, a relação custo-benefício.

Matematicamente, pode-se demonstrar esta afirmação quando, na expressão do fator de valor presente, o período de análise assume valores muito grandes. No limite, quando n tende a infinito, a expressão do valor presente fica:

$$\text{VPL} = -I + \frac{A}{i} = 0 \quad (12.11)$$

Se i é a taxa interna de retorno, verifica-se que esta realmente está diretamente ligada à relação benefício-custo, ou custo-benefício:

$$\text{TIR} = \frac{A}{I} \quad (12.12)$$

Outros conceitos importantes são os de valor *residual* e de *vida residual*. Dado um equipamento, o valor residual pode ser comparado ao preço que se ganharia ao vendê-lo em seu estado atual. Da mesma forma, a vida residual é a diferença entre a vida útil do equipamento e o tempo de uso do mesmo.

12.4.4 Método do tempo de retorno de capital

O critério do tempo de retorno de capital, ou *payback*, sem dúvida, é o mais difundido no meio técnico para análises de viabilidade econômica, principalmente devido à sua facilidade de aplicação e de compreensão. Nestes termos, fala-se do chamado *payback* não descontado, isto é, um procedimento de cálculo em que não se leva em consideração a taxa de juros. Esta análise é feita apenas dividindo-se o custo da implantação do empreendimento pelo benefício auferido. Em outras palavras, este critério mostra quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao investimento.

12.5 Análise de alternativas de investimento sob condições específicas

12.5.1 Alternativas com vidas diferentes

Há casos em que é necessário decidir entre alternativas cujos horizontes de análise são diferentes. Como é necessário que o número de períodos das alternativas em análise seja igual, uma solução é calcular o mínimo múltiplo comum dos períodos das alternativas ou repetir os fluxos tantas vezes quanto forem necessárias até que os tempos se igualem.

12.5.2 Alternativas com restrições financeiras

Geralmente, as empresas elaboram seu plano de investimentos para o ano subsequente. Contudo, em face da limitação orçamentária, é necessário decidir quais investimentos, do conjunto planejado, devem ser executados. Neste caso, a análise econômica pode ser aplicada para selecionar aqueles de maior atratividade.

12.5.3 Exemplo de aplicação

Seja uma caldeira que opera com óleo combustível (OC) e que por restrições ambientais, torne-se necessário investir em um sistema de limpeza de gases. Uma alternativa consiste em adquirir uma caldeira a gás natural (GN) de mesma capacidade e arcar com os custos de implantação do ramal do gasoduto. Desprezando o valor residual das caldeiras, selecione a alternativa mais atrativa, considerando:

■ Receita anual com a venda de vapor	\$ 203 milhões
■ Vida útil da caldeira	25 anos
■ Investimento em uma caldeira nova	\$ 13,5 milhões
■ Investimento em um sistema de limpeza de gases	\$ 2,5 milhões
■ Vida útil do sistema de limpeza de gases	25 anos
■ Despesa com O&M da caldeira á óleo	\$ 200 milhões
■ Investimento em uma caldeira a GN	\$ 18 milhões
■ Vida útil da caldeira a GN	30 anos
■ Investimento em um ramal de gasoduto	\$ 20 milhões

- | | |
|-------------------------------|----------------|
| ■ Vida útil do gasoduto | 30 anos |
| ■ Despesa anual com O&M | \$ 195 milhões |
| ■ Taxa mínima de atratividade | 15% a.a. |

Fluxos de Caixa

Para simplificar os cálculos, é recomendável que se trabalhe com fluxo sempre que possível. Neste exemplo, anualmente, há receitas decorrentes da venda do vapor e despesas de O&M, que, no caso da caldeira a óleo, será um fluxo positivo de \$ 3 milhões por ano; para a caldeira a gás natural, de \$ 8 milhões.

Como se trata de alternativas com vida diferente, é necessário igualar os fluxos de caixa no tempo. Empregando-se o mínimo múltiplo comum, obtém-se 150 anos. Portanto, o fluxo de caixa da caldeira a óleo deve ser repetido 6 vezes e o outros, 5 vezes.

O investimento total com a opção da caldeira a óleo é de \$ 16 milhões a cada 25 anos; a da caldeira a gás, será de 38 milhões a cada 30 anos.

Aplicando-se as equações apresentadas acima com uma taxa de juros igual a TMA, obtêm-se os seguintes resultados:

■ Método do benefício líquido

Caldeira a OC:	\$ 2.373.109,00
Caldeira a GN:	\$ 13.023.220,00

Separando os custos (fluxo negativo total) e os benefícios (fluxo positivo total), verifica-se que a alternativa de caldeira a GN apresenta uma relação benefício/custo de 1,32; a outra alternativa, de 1,13.

■ Método do valor anual líquido

Caldeira a OC:	\$ 355.966,00
Caldeira a GN:	\$ 1.953.483,00

■ Método da taxa interna de retorno

Caldeira a OC:	17% a.a.
Caldeira a GN:	19,8% a.a.

Verifica-se que ambas alternativas apresentam rentabilidade superior à TMA.

■ Método do tempo de retorno do investimento não descontado (com juros)

Caldeira a OC:	12 anos
Caldeira a GN:	9 anos

Conclusão: Todos os métodos apresentados apontam que a melhor alternativa de investimento é a caldeira a gás natural.

Essas análises também podem ser aplicadas, por exemplo, no caso da escolha entre reformar uma caldeira antiga ou substituí-la por uma nova, com maior eficiência e menor consumo de combustível. Para isso, deve-se levar em consideração o investimento necessário à compra e à instalação da nova caldeira versus o investimento necessário à reforma da antiga, além do custo do vapor produzido por cada uma, devendo-se considerar ainda que se trata de alternativas com vidas diferentes. Na caldeira com maior eficiência há redução de consumo de combustível e, portanto, no do custo do vapor gerado, mas com um investimento inicial muito maior e uma vida útil maior também. Este é um exemplo que demonstra a aplicação dos métodos de análise econômica para tomada de decisões.

13 Bibliografia

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Power Boilers, ASME - Boilers and Pressure Vessel Code, New York, 1980

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Inspeção de Segurança de Caldeiras Es-tacionárias, ABNT-NB-55, Amostragem de Águas de Caldeiras, ABNT-NB-584

BABCOCK & WILCOX, Steam: its generation and use, Babcock & Wilcox, New York, 1985

BEGA, E. A. Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras, Editora técnica, rio de janei-ro, 1989

MAGRINI, R. O., Riscos de acidentes na operação de caldeiras, Ministério do Trabalho e Pre-vidência Social, São Paulo , 1991

PERA, H., Geradores de vapor, Ed. FAMA, São Paulo, 1990

PULL, E., Caldeiras de Vapor, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1989

SHIELDS, C. D., Boilers type; characteriestics and functions, MacGraw Hill, new york, 1982

TREFFER, R., La sécurité dans l'exploitation e l'entretien dès chaudières à vapeur, Revue de Protection, Paris, 1962

14 Links Úteis

Assistherm Assistência Térmica Ltda - Caldeiras e Aquecedores
<http://www.assistherm.com.br>

Atec Combustão e Caldeiras Ltda. epp
www.ateccaldeiras.com.br

DOMEL -Caldeiras e Aquecedores - Fabricante.
www.domel.com.br

SUBCON Indústria e Comércio Ltda - Manutenção de Caldeiras
www.subcon.hpg.ig.com.br

TEC Caldeiras e Sistemas Ltda - Equipamentos & Caldeiras
www.teccaldeiras.com.br

Triumpho Caldeiraria Ltda.
www.triumpho.ind.br

ANEXO

Cogeração

1 - Fundamentos

A cogeração é a produção simultânea de potência, mecânica ou elétrica, e de calor útil a partir de uma única fonte de calor. Busca-se com este procedimento de conversão energética melhorar a qualidade da energia produzida por um combustível e reduzir as perdas que ocorrem em sua utilização.

A qualidade de um fluxo energético está associada, fundamentalmente, à capacidade de sua conversão em outros tipos de energia. Assim, a energia elétrica é considerada uma forma nobre de energia, já que pode ser totalmente convertida em qualquer outra, enquanto o calor e, por consequência, os combustíveis têm sua qualidade determinada em função da temperatura na qual se verifica o fluxo energético correspondente. Níveis mais altos de temperatura correspondem a uma maior qualidade energética em um fluxo de calor.

Por exemplo, a maior perda em uma central térmica a vapor não é o calor rejeitado no condensador, uma inevitável imposição termodinâmica, mas as perdas irreversíveis associadas às grandes diferenças de temperatura que se observam na caldeira. Uma central termoelétrica consegue converter em eletricidade no máximo a metade do calor produzido na queima do combustível. A maior parte é perdida. Em geral, estas perdas de calor são conduzidas para a água de resfriamento dos condensadores ou para a atmosfera, através das torres de resfriamento, e não produzem qualquer efeito útil.

A utilização de calor nas indústrias é freqüente. Em sua grande parte ocorre, sob níveis não muito altos de temperatura, ao redor de 150°C a 200°C, níveis de temperaturas típicas para os processos de secagem, cozimento, evaporação, etc. Porém, para a produção desta energia térmica são geralmente empregados combustíveis cujas chamas estão entre 1400°C e 1800°C. Assim, o processo convencional de produção e utilização de calor em indústrias parte de uma energia térmica de alta qualidade para fornecer uma energia de baixa qualidade. É por isto que mesmo as melhores caldeiras e fornos, ainda que alcancem rendimentos energéticos próximos a 90%, destroem-se irreversivelmente mais da metade da qualidade do fluxo de calor. A cogeração, ao produzir trabalho e calor úteis, reduz as perdas de energia e permite abastecer ambas as demandas com quase o mes-

mo consumo de combustível. Estes fundamentos da termodinâmica é que sustentam todas as vantagens da cogeração, já que níveis mais altos de eficiência implicam a redução do consumo de combustíveis, assim como de todos os demais custos associados, inclusive o custo ambiental.

2 - Evolução e utilização da cogeração

A cogeração não é uma tecnologia nova. Já tem sido utilizada em muitas unidades industriais como um meio econômico de fornecer, parcial ou totalmente, suas necessidades térmicas e elétricas. Contudo, foi apenas nos últimos anos que ganhou expressivo impulso.

No Brasil, a cogeração é utilizada, tradicionalmente, em alguns setores industriais, destacando-se as indústrias de papel e celulose, sucroalcooleira, siderúrgica e petroquímica, especialmente por contarem com resíduos de processo passíveis de utilização como combustíveis e demandas de calor e energia elétrica.

Aplicações nos setores químicos, em refinarias de petróleo, em siderúrgicas, em indústrias de papel e celulose, no setor sucroalcooleiro e em indústrias de alimentos, além de hospitais, centros comerciais, complexos de escritórios, entre outros, têm demonstrado a potencialidade da cogeração para fornecer, simultaneamente, formas diferentes de energia úteis.

Atualmente, a cogeração apresenta expectativas de expansão, devido principalmente, às alterações do cenário institucional brasileiro, como a Resolução ANEEL 21, de 21 de janeiro de 2000, que estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais cogeneradoras de energia.

A cogeração passou a ser encarada novamente como uma importante alternativa energética, em razão do aumento dos preços dos combustíveis e da valorização da eficiência energética. Contribuíram para isso: o desenvolvimento tecnológico de turbinas a gás e de motores com capacidade e desempenho compatíveis com as necessidades de consumidores industriais e comerciais; a maior disponibilidade de gás natural na matriz energética brasileira em diversas regiões, particularmente na Sudeste, com a implantação do gasoduto Brasil-Bolívia; e a existência de incentivos no uso deste combustível para cogeração, tal como dispõe a legislação do Estado de São Paulo. Também, a intensificação das pressões por processos de conversão energética sustentáveis e com menores emissões de CO₂, para atenuar os impactos de caráter global, como o efeito estufa, a destruição da camada de ozônio, a chuva ácida e a poluição nas grandes cidades. Essas mudanças mostraram-se decisivas na reabilitação da geração descentralizada de energia, sobretudo da cogeração.

A tecnologia dos sistemas de cogeração expandiu-se recentemente de modo diferenciado das condições de seu primeiro ciclo de expansão, podendo-se identificar duas fases distintas: a tradicional e a moderna. A tabela I apresenta esta diferenciação.

TABELA I – DIFERENCIAÇÃO ENTRE COGERAÇÃO TRADICIONAL E COGERAÇÃO MODERNA

ASPECTO	COGERAÇÃO	
	TRADICIONAL	MODERNA
Motivação básica	Auto-suficiência de energia elétrica	Venda de excedentes e redução de emissões
Equipamento de geração predominante	Turbinas a vapor	Turbinas a gás e ciclos combinados
Combustíveis usuais	Residuais (bagaço, cascas)	Todos
Relação com a concessionária	Operação independente	Operação interligada

A cogeração tradicional é encontrada na indústria sucroalcooleira na qual o bagaço da cana-de-açúcar é o combustível empregado para a produção de vapor, que, após acionar as turbinas da moenda e do turbogerador, atende a demandar de calor no processo industrial.

Outro exemplo refere-se às centrais de utilidades das plantas de produção de celulose a partir de madeira, que concentram e queimam o resíduo dos digestores de produção da polpa, o licor negro, recuperando produtos químicos de valor para o processo produtivo e produzindo vapor de alta pressão, que permite gerar energia elétrica e atender à demanda térmica no processo industrial. As motivações nestes casos têm sido a disponibilidade de combustíveis residuais e a necessidade de assegurar um suprimento confiável de eletricidade.

A cogeração moderna é muito variada, sendo notável a penetração das turbinas a gás, com seus gases quentes de escape servindo para a produção de vapor de processo em caldeiras de recuperação, empregadas em todos os setores, inclusive em empresas do setor terciário, e em um amplo espectro de capacidades instaladas.

A produção combinada de energia elétrica e de calor útil pode ser realizada empregando motores de combustão interna e turbinas a vapor ou a gás, pois em todos eles existe, necessariamente, a rejeição de calor não convertido em potência de eixo, que pode então ser utilizado para atender uma demanda térmica em nível de temperatura compatível com as disponibilidades.

Considerando as condições dos consumidores industriais, os ciclos com turbinas, a vapor ou a gás, tendem a ajustar-se melhor aos requerimentos típicos de energia elétrica e calor de processo para cogeração. São, portanto, os mais adotados. Os consumidores do setor terciário, como shopping, hospitais, hotéis e supermercados, também apresentam interesse pelos motores de combustão interna de ciclo diesel ou Otto.

3 - Tipos de sistemas de cogeração

Os principais ciclos térmicos utilizados em cogeração empregam turbinas a vapor, turbinas a gás e motores alternativos. Em todos eles existe, necessariamente, a rejeição de calor não convertido em potência de eixo, que pode então ser utilizado para produzir vapor.

Quanto à disposição da demanda de calor em relação à geração de energia elétrica na central cogeneradora, dois tipos de sistemas de cogeração podem ser utilizados, os quais devem ser escolhidos conforme as necessidades térmicas e elétricas de cada processo e, fundamentalmente, em função do nível de temperatura desejado na demanda de calor.

Assim, de acordo com a posição relativa da geração de energia na seqüência de geração e utilização de calor, os sistemas de cogeração podem ser de dois tipos: a) geração elétrica a montante ("topping"), quando a produção de eletricidade antecede o fornecimento de calor útil; ou b) geração elétrica a jusante ("bottoming"), quando a geração elétrica está situada após a demanda térmica. A terminologia em inglês é de uso corrente nestes casos.

Os sistemas de cogeração do tipo "bottoming" são de emprego mais restrito, em geral, porque o calor rejeitado em processos industriais já está em níveis de temperatura relativamente baixos para a produção de potência, sendo utilizado quando se dispõe de calor sob elevadas temperaturas, como em fornos cerâmicos, indústrias cimenteiras ou plantas metalúrgicas, em que podem ser rejeitados gases em altas temperatura.

Os sistemas de cogeração podem ser:

- **Indiretos** - utilização do calor dos gases de escape para a produção de vapor. Ex.: cogeração com turbinas a gás e cogeração com motores alternativos; ou
- **Diretos** - vapor de escape, vapor de contra pressão. Ex.: cogeração com turbinas a vapor

3.1 Cogeração com turbinas a gás

Os elementos fundamentais que constituem uma turbina a gás são: compressor, câmara de combustão e turbina propriamente dita. Em seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera e comprimido, passando para a câmara de combustão, onde se mistura com o combustível. Nesta câmara ocorre a reação de combustão, produzindo gases quentes, que escoam através da turbina, onde se expandem, movendo rodas com palhetas e produzindo potência mecânica para acionar o eixo do compressor e da carga (frequentemente, um gerador elétrico). Vale lembrar que, como os produtos de combustão atravessam a turbina, os combustíveis utilizados devem ser de qualidade, como é o caso do gás natural e dos derivados claros de petróleo.

Duas instalações com turbinas a gás - uma operando sem recuperação de calor de exaustão e a outra operando com recuperação - em um sistema de cogeração possuem um balanço térmico típico, indicando que o primeiro sistema consegue uma eficiência elétrica de 20% o que resulta num total de perdas de 80%. Ao se utilizar o calor de escape da turbina, a eficiência elétrica se mantém a mesma, porém as perdas se reduzem a 20%, devido à recuperação de calor de exaustão, totalizando uma eficiência energética global de 80%. Dessa forma, fica claro como os sistemas de cogeração apresentam uma eficiência na utilização do combustível mais elevada.

Os gases de escape da turbina podem ser aproveitados diretamente para processos térmicos ou de modo indireto na produção de vapor ou água quente, utilizando uma caldeira de recuperação ou os gases como comburente nos queimadores de caldeiras convencionais. A temperatura destes gases situa-se geralmente entre 420° e 650°C, com um conteúdo de oxigênio entre 14% e 17% em volume.

O calor de escape, frequentemente, é utilizado para a produção de vapor constituindo-se em vetor energético de amplo uso na indústria. Para sua produção, podem ser empregadas caldeiras de recuperação ou podem modificar-se caldeiras convencionais. Neste último caso, pode ocorrer uma sensível diminuição no rendimento global da instalação. Nas caldeiras de recuperação, ao contrário das caldeiras convencionais, a transmissão de calor ocorre, essencialmente, por convecção, podendo ser construídas com 1, 2 ou 3 níveis de pressão. Geralmente, a adoção de um número mais alto de níveis de pressão está

associada a ganhos de desempenho quando o uso posterior do vapor ocorre em ciclos com turbinas a vapor.

3.2 Cogeração com motores alternativos

Os motores de combustão interna, de ignição por centelha (Otto) ou de ignição por compressão (diesel) também são utilizados em sistemas de cogeração. O rendimento térmico obtido com estes motores pode ser similar ao obtido com as turbinas a gás ou turbinas a vapor, mas apresentam como desvantagem a maior dificuldade na recuperação do calor, limitado às baixas temperaturas. Entretanto, há muitas situações em que estes acionadores representam a melhor alternativa, como é o caso de centros comerciais, supermercados, hotéis, hospitais e empresas alimentícias, situações tipicamente com demandas de energia elétrica da ordem de alguns megawatts.

Também os motores de combustão interna são apresentados em duas instalações, uma operando como central de geração elétrica e outra operando em um sistema de cogeração. Um balanço térmico representativo mostra que para uma mesma quantidade de combustível fornecida o primeiro sistema consegue uma eficiência elétrica de 36%, o que resulta num total de perdas de 64%. De outro lado, ao se utilizar o calor de escape do motor, a eficiência elétrica se mantém praticamente a mesma, enquanto que as perdas se reduzem a 24%, devido à utilização deste calor, cujo aproveitamento estaria por volta de 40%, totalizando uma eficiência energética global de 76%.

As perdas mais significativas nos motores de combustão interna são: de calor nos gases de escape; no óleo lubrificante, água ou ar de arrefecimento; e de calor através da superfície do motor. Comparativamente aos motores Otto, os motores diesel apresentam maiores perdas de calor pelas paredes do motor e menores perdas nos gases de escape. O rendimento global de um motor Otto está compreendido entre 27% e 30%, enquanto que o rendimento global de um motor Diesel está entre 30% e 45%.

Em função das condições impostas pelo usuário de calor, os sistemas de recuperação térmica para motores de combustão interna podem assumir distintas configurações. Até temperaturas inferiores à de ebulição da água de arrefecimento, os sistemas são simples e podem incluir trocadores de calor para a carga e de rejeição de calor para as situações de carga reduzida, quando é necessário manter o motor operando e não existe demanda térmica. Para temperaturas mais elevadas, inclusive para a geração de vapor de baixa pressão, em temperaturas de cerca de 120°C, os sistemas devem ser pressurizados e exigem sistemas mais complexos de segurança e de controle.

Outro procedimento possível para recuperação da energia térmica em motores baseia-se na refrigeração do motor, mediante a vaporização parcial da água de refrigeração, que, por meio de um separador de vapor, permite obter vapor saturado com título relativamente elevado. Como nos casos anteriores, para este tipo de acionador primário é preciso ter em conta a segurança de operação do motor, incorporando controles adequados, imprescindíveis para assegurar que o calor não utilizado seja rejeitado efetivamente.

Existem disponíveis no mercado diversos grupos geradores de pequena de média potência já incorporando os trocadores de calor e os sistemas de controle e de redução de ruídos para instalação rápida em espaços reduzidos. O calor recuperável nos motores de combustão interna, a partir da água de refrigeração, está compreendido entre 0,5 a 0,8 kWh por kWh elétrico gerado. Considerando o óleo de lubrificação e os gases de escape, a energia recuperável está compreendida entre 0,4 a 0,7 kWh e por volta de 0,45 kWh por kWh produzido, respectivamente.

3.3 Cogeração com turbinas a vapor

O acionamento da turbina se produz pela expansão do vapor de alta pressão procedente de uma caldeira convencional. Essa expansão se realiza nos bocais fixos e nas palhetas móveis, montadas nos rotores, em um ou mais estágios, onde a energia contida no vapor se transforma, primeiro, em energia cinética e, em seguida, em energia mecânica, impulsionando as palhetas. Embora a energia mecânica gerada receba as mesmas aplicações que no caso da turbina a gás, o vapor de baixa ou de média pressão rejeitado pelas turbinas poderá ser aproveitado em um processo industrial quando o mesmo necessitar de vapor ou de energia térmica a um nível relativamente baixo de temperatura, geralmente inferior a 200°C.

Duas instalações com turbinas a vapor - uma operando como uma central de geração elétrica e a outra operando em um sistema de cogeração. O balanço térmico correspondente, para uma mesma quantidade de combustível fornecida, indica que o primeiro sistema consegue uma eficiência elétrica de 28%, o que resulta num total de perdas de 72%. De outro lado, ao se utilizar o vapor de escape da turbina, a eficiência elétrica pode se reduzir um pouco, assumida neste caso em 20%, mas as perdas totais se reduzem a 18%, devido à utilização do vapor de escape em um processo industrial, totalizando uma eficiência energética global de 82%.

A turbina de vapor como elemento motor é mais simples que a turbina de gás, embora, quando se consideram os restantes elementos necessários para realizar o ciclo (caldeira,

ra, trocadores de calor, bombas, condensador, desaeradores, etc.), a instalação, é sem dúvida, mais pesada e complexa. De outro lado, é uma tecnologia mais conhecida e bem dominada, com muitos fabricantes de equipamentos, particularmente na faixa de potência dos sistemas de cogeração.

Ainda que os fabricantes procurem reduzir seus custos mediante a padronização das unidades, existe uma ampla variedade de tipos e modelos de turbinas a vapor, cada qual mais adequado a uma aplicação específica, com diversas opções quanto a número de estágios, sistema de controle e tecnologia de materiais e de fabricação.

Uma característica importante destes sistemas de cogeração refere-se à sua capacidade de utilizar qualquer combustível, desde resíduos industriais, como bagaço de cana, até combustíveis mais nobres, como o gás natural. Outro aspecto positivo desta tecnologia é o fato de o vapor ser largamente empregado como vetor energético para aquecimento em processos industriais; nesse caso, já disponível no escape das turbinas.

