

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR

MANUAL PRÁTICO

Créditos

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

Aloísio 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

CONSÓRCIO 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 / Túlio 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

AUTORES

Luiz Augusto Horta Nogueira *,

Carlos Roberto Rocha,

Fábio José H. Nogueira *

Co-autor: **Marco Aurélio Guimarães Monteiro**

* Professores da Universidade Federal de Itajubá

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. O objetivo principal do PROCEL é contribuir para a redução do consumo e da demanda de energia elétrica no país, por meio do combate ao desperdício deste valioso insumo.

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.

Nesse contexto, o GEF, que concede suporte financeiro a 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 projeto “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 dos setores industrial, comercial, prédios públicos e saneamento, difundindo aspectos tecnológicos e operacionais que permitam reduzir o desperdício de energia elétrica.

O objetivo deste manual é instrumentalizar os interessados com informações úteis e práticas, capacitando-os para identificar oportunidades de redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.

Sumário

INTRODUÇÃO	9
Parte I - PLANO DE AÇÃO	13
1 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO	13
1.1 - Conhecimento de um sistema de vapor genérico	13
1.2 - Conhecimento do sistema de vapor específico da sua empresa	15
2 - IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS	16
2.1 - Oportunidades de melhoria em um sistema de vapor geral	17
2.2 - Oportunidades de melhoria em sistema de vapor específico da sua empresa	19
3 - IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS	20
3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de vapor genérico	20
3.2 - Implementação de melhorias no sistema de vapor específico da sua empresa	20
4 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO CICLO DO PLANO DE AÇÕES	21
Parte II - OPORTUNIDADES DE MELHORAR A EFICIÊNCIA	25
1 - IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE VAPOR	25
1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na geração de vapor	25
1.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na geração	30
1.2.1 - Redução de perdas nos gases da chaminé	31
1.2.2 - Redução do nível de excesso de ar e melhoria da eficiência da combustão	34
1.2.3 - Recuperação de calor dos gases de escape pela utilização de economizador ..	35
1.2.4 - Recuperação de calor dos gases de escape usando pré-aquecedor de ar	36
1.2.5 - Redução de perdas de calor por radiação e convecção (perda no envoltório da caldeira)	37
1.2.6 - Recuperação de calor da descarga de fundo (blowdown)	38
1.2.7 - Redução das perdas de calor associadas à umidade do combustível	39
1.3 - Exemplos	39
1.3.1 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Direto	39
1.3.2 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Direto	41
1.3.3 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Indireto	42

1.3.4 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Indireto	44
1.3.5 - Influência da temperatura da água de alimentação no consumo de combustível	45
1.4 - Sugestões para identificar oportunidades na geração	47
2 - IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR	48
2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição de vapor	48
2.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência na distribuição	48
2.2.1 - Vazamento de vapor	49
2.2.2 - Redução de perda de calor através da isolamento térmica	50
2.2.3 - Recuperação do condensado	58
2.2.4 - Recuperação do vapor flash	59
2.3 - Exemplos	61
2.3.1 - Cálculo do valor econômico do condensado	61
2.3.2 - Cálculo da viabilidade do retorno do condensado	63
2.3.3 - Cálculo da quantidade de vapor flash no condensado	63
2.4 - Sugestões para identificar de oportunidades na distribuição	65
3 - IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NO USO FINAL DE VAPOR	66
3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no uso final	66
3.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência no uso final	66
3.2.1 - Utilização de vapor direto	67
3.2.2 - Redução de perda de calor em equipamento de uso de vapor indireto	67
3.2.3 - Recobrimento de recipientes abertos e aquecidos	70
3.3 - Exemplos	71
3.3.1 - Cálculo de rendimento em trocador de calor	71
3.3.2 - Cálculo de rendimento em um pasteurizador	72
3.4 - Sugestões para identificação de oportunidades	73
4 - ASPECTOS ECONÔMICOS	75
4.1 - Benchmarking para o custo de vapor	75
4.2 - Índices de referência de custo de geração de vapor nos EUA	76
4.3 - Índices de referência de custo de geração de vapor no Brasil	77
4.4 - Custo efetivo do vapor	80
Parte III - FONTES DE CONSULTA	85
1 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
2 - LINKS ÚTEIS	87
APÊNDICES	91

Introdução

Os sistemas de vapor são de grande importância industrial em processos que necessitam de uma fonte de energia térmica.

O 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.

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), alta densidade energética e elevada taxa de transferência de energia.

Objetivo

Disponibilizar informações técnicas úteis e práticas aos profissionais de empresas que possuem sistemas de vapor, capacitando-os a identificar oportunidades de melhoria da eficiência energética que resultem em redução de custos e de consumo de energia em seu sistema.

Público alvo

Técnicos, engenheiros e participantes de Comissões Internas de Energia (CICE) em cujas empresas existam sistemas de vapor e consultores de engenharia e demais profissionais que trabalhem com este sistema.

Orientações gerais

Este Manual faz parte de um conjunto de publicações editadas pela Eletrobrás/Procel. Apresenta, de forma sucinta, dicas para melhorar a eficiência que contribuam para a redução de custos e o consumo de energia. Simultaneamente, a Eletrobrás/Procel está editando uma publicação com conteúdo mais abrangente sobre este tema, para servir de consulta e suporte aos profissionais que desejarem se aprofundar no assunto.

As oportunidades de eficiência energética apontadas neste manual são um extrato dos conceitos e fundamentos apresentados na referida publicação. Assim, ao apresentar as informações neste manual, procuraremos referenciar ao texto original para o usuário que desejar informações sobre o assunto.

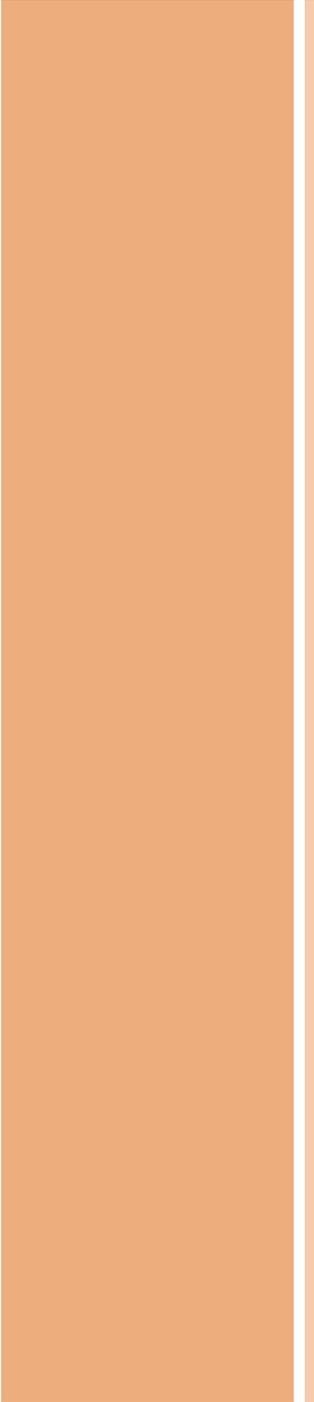
Procurando oferecer uma ferramenta de uso prático e útil, incluímos um CD contendo uma versão eletrônica deste manual, disponibilizando, também, textos, planilhas e tabelas que servem para complementar as informações e auxiliar no desenvolvimento de um programa de eficiência.

O Manual está dividido em quatro partes:

1. PLANO DE AÇÃO
2. OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA
3. FONTES DE CONSULTA
4. APÊNDICE

Naturalmente, o foco do Manual será a parte 2: oportunidades para melhorar a eficiência.

Para facilitar e agilizar a consulta a este Manual, constam no anexo as grandezas e unidades de medida, fatores de conversão e as fórmulas aqui utilizadas, bem como no texto base. ("EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR")



PARTE I
PLANO DE AÇÃO

PARTE I - PLANO DE AÇÃO

Às empresas interessadas em melhorar a eficiência energética e o desempenho econômico de sistema de vapor, este Manual sugere que os seguintes passos sejam obedecidos:

1

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E DA INSTALAÇÃO ONDE ESTÁ INSERIDO

Este Manual utiliza quatro categorias para discutir os componentes de um sistema de vapor: geração; distribuição; uso final; e recuperação. Todas seguem o trajeto do vapor desde que sai da caldeira até o seu retorno, através do sistema de recuperação de condensado.

1.1 - Conhecimento de um sistema de vapor genérico

O conhecimento de um sistema de vapor genérico característico, com seus componentes básicos de geração, distribuição, uso final e recuperação, com as respectivas condições operacionais, pode facilitar a caracterização de um sistema de vapor em particular (por exemplo, o sistema da sua empresa).

A Figura I.1 fornece uma descrição esquemática das quatro áreas principais de um sistema de vapor.

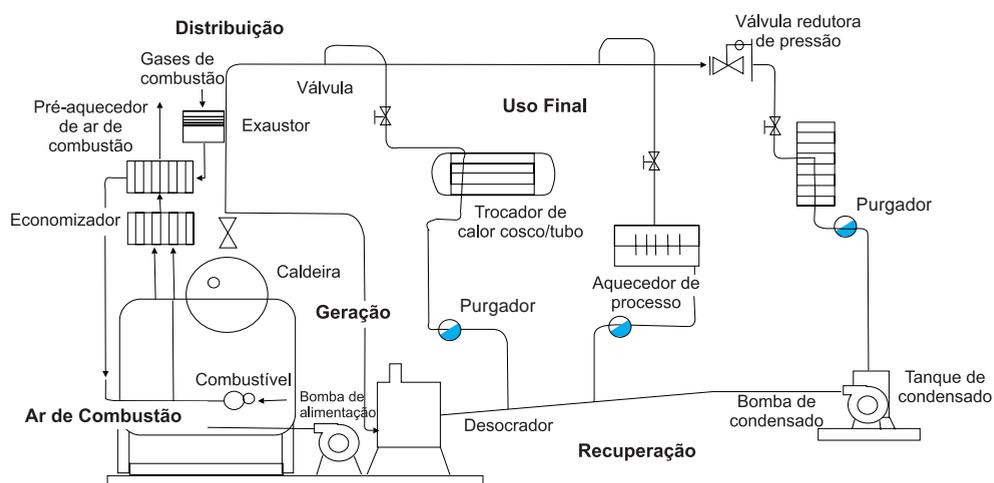


Figura I.1 - Esquema de um sistema de vapor completo

Sistemas de geração de vapor - O vapor é gerado em uma caldeira ou em um gerador de vapor pela transferência do calor dos gases quentes para a água. Quando a água absorve quantidade suficiente de calor, muda da fase líquida para a de vapor. A energia para gerar o vapor pode ser obtida da combustão de combustíveis ou da recuperação de calor residual de processo. Na caldeira, a transferência de calor entre os gases quentes e a água é efetuada nas superfícies de troca térmica (geralmente um conjunto de tubos). Após a geração do vapor, o efeito da pressão faz o vapor fluir da caldeira para o sistema de distribuição. As partes mais importantes de um sistema de geração incluem: caldeira, sistema de alimentação de combustível, sistema injeção de ar de combustão, sistema de alimentação de água e sistema de tiragem dos gases de exaustão. Estes sistemas estão relacionados, visto que problemas ou alterações em um geralmente afetam o desempenho dos outros.

Sistemas de distribuição de vapor - A distribuição transporta o vapor da caldeira aos pontos de uso final, entregando quantidades suficientes de vapor nas pressões e temperaturas adequadas às aplicações de uso final. Para isso, muitos sistemas de distribuição têm diversas linhas de transmissão, que operam em diferentes pressões. Estas linhas são separadas por vários tipos de válvulas de isolamento, válvulas reguladoras de pressão e, às vezes, turbinas de contrapressão para redução da pressão, com maior eficiência energética. O desempenho eficiente do sistema de distribuição requer um correto balanceamento da pressão do vapor nas linhas, com regulagem eficaz da pressão, boa drenagem de condensado, perfeita estanqueidade e adequada isolamento térmica.

Sistemas de uso final de vapor - Há diferentes aplicações de uso final para o vapor, incluindo aplicações em processos de aquecimento, movimentação mecânica, produção de reações químicas, limpeza, esterilização e fracionamento de componentes de hidrocarboneto em misturas. Os equipamentos mais comuns de sistema de uso final de vapor são: trocadores de calor, turbinas, torres de fracionamento e tanques de reação química. Em um trocador de calor, o vapor transfere seu calor latente a um líquido de processo. O vapor é mantido no trocador de calor por um purgador de vapor até que se condense. Neste ponto, o purgador deixa passar o condensado para a linha de drenagem de condensado, ou sistema do retorno de condensado. Em uma turbina, o vapor transforma sua energia térmica em trabalho mecânico, para acionar máquinas rotativas, tais como: bombas, compressores, ou geradores elétricos. Em torres de fracionamento, o vapor facilita a separação de vários componentes de um líquido processo.

Sistema de retorno de condensado - O sistema de retorno de condensado envia o condensado de volta à caldeira. O condensado é retornado inicialmente ao tanque coletor ou tanque de condensado. Do tanque coletor, o condensado é bombeado para o desaerador, o qual retira oxigênio e gases não-condensáveis. Água de alimentação e os produtos químicos de tratamento podem ser adicionados no tanque ou no desaerador. As

bombas de alimentação da caldeira aumentam a pressão desta água, a pressões superiores à da caldeira, injetando-a no interior da caldeira, para completar o ciclo.

O conhecimento do balanço energético característico deste sistema pode contribuir muito para a identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema e fornecem um ponto de partida para a identificação de oportunidades e de seleção e implementação de ações de melhorias da eficiência. A Figura I.2 mostra um balanço de energia característico com as perdas de um sistema de vapor.

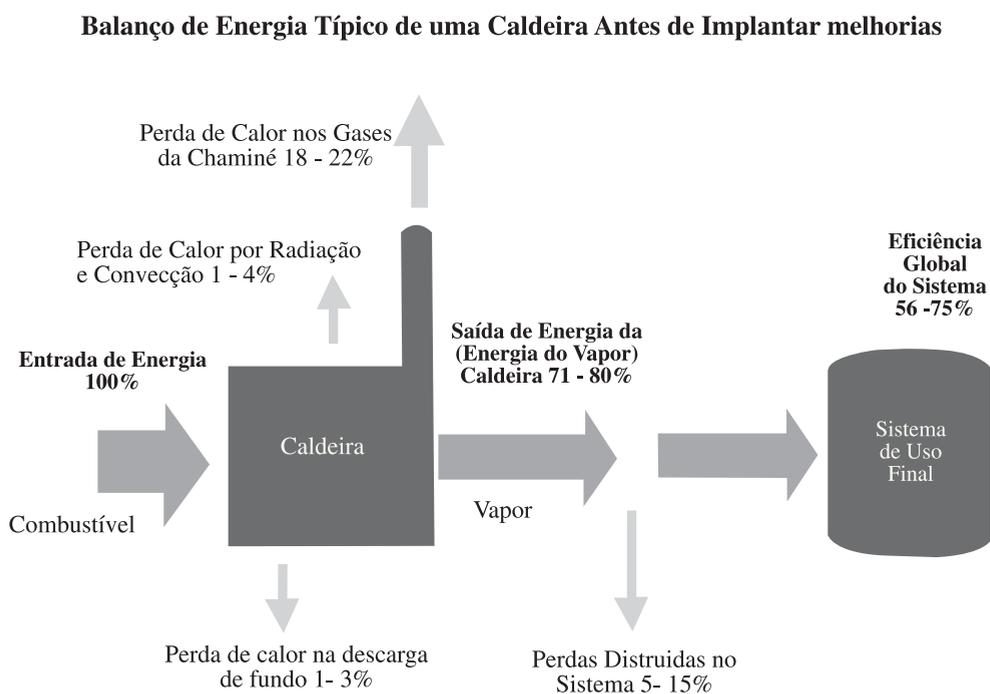


Figura I.2 - Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema

1.2 - Conhecimento do sistema de vapor específico da sua empresa

Para caracterizar um sistema de vapor específico, sugerem-se os seguintes passos:

- a) Elaborar um diagrama de blocos das instalações da planta ou dos processos industriais, indicando onde o vapor é aplicado.

- b)** Com base no leiaute da planta ou instalação industrial, indicar a localização dos componentes do sistema de vapor e as condições operacionais nominais ou de projeto (temperaturas, pressões, vazões).
- c)** Criar um perfil dos "parâmetros operacionais" (demanda de vapor; produção de vapor; consumo de combustível; pressão e/ou temperatura do vapor na geração; e distribuição) do sistema ao longo do dia, semana, mês e ano, o que for necessário para entender o funcionamento do sistema e verificar sazonalidades ou não.
- d)** Levantar os dados reais (medições). A partir da instrumentação existente ou de medições instantâneas, verificar os valores reais dos parâmetros operacionais. Levantar o regime de funcionamento, picos de carga, consumo e capacidades totais e por período. Simultaneamente, deve-se contabilizar a produção ou consumo que ocorreu no período de medição.

Os índices de referência (benchmarks) mais usuais nos sistemas de vapor, normalmente, são os de custo unitário de produção de vapor, eficiência energética da caldeira e consumo específico por produto:

- O custo unitário de produção do vapor relaciona a quantidade de combustível consumido e seu preço para produzir um quilo de vapor.
- A eficiência energética da caldeira está relacionada com a quantidade de energia que a caldeira transfere do combustível para o vapor.
- O consumo específico por produto, ou a necessidade de energia do produto final, é quantidade de vapor necessária a produção de uma unidade ou um quilo de produto.

2

IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

Quando se busca a melhoria da eficiência de um sistema de vapor específico, a principal etapa é a identificação das oportunidades.

2.1 - Oportunidades de melhoria em um sistema de vapor geral

Muitas oportunidades de melhorar a eficiência em sistema de vapor são comuns em muitas instalações industriais. Estas oportunidades podem ser classificadas de acordo com a parte do sistema na qual são implementadas. Oportunidades comuns de melhorar a eficiência para as áreas de geração, distribuição e recuperação de um sistema de vapor estão listadas nos Tabelas I.1 a I.3.

Tabela I.1 - Oportunidades de melhorar a eficiência na geração

OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO	DESCRIÇÃO
Minimizar o excesso de ar.	Reduzir a quantidade de calor perdido nos gases de escape na chaminé, permitindo que maior quantidade de energia do combustível seja transferida para o vapor.
Limpar as superfícies de transferência de calor da caldeira.	Promover a efetiva transferência de calor dos gases de combustão para o vapor.
Instalar equipamentos de recuperação de calor (economizadores para a água de alimentação ou pré-aquecedores para o ar de combustão).	Recuperar o calor disponível nos gases de exaustão e transferi-lo de volta para o sistema pelo pré-aquecimento da água de alimentação ou do ar de combustão.
Aperfeiçoar o tratamento de água, para minimizar as descargas de fundo da caldeira.	Reduzir a quantidade total de sólidos dissolvidos na água da caldeira, o que permite reduzir as descargas e, portanto, perder menos energia.
Recuperar a energia da descarga de fundo da caldeira.	Transferir o calor disponível no fluxo da descarga de fundo da caldeira de volta para o sistema, reduzindo a perda de energia.
Adicionar / restaurar os refratários da caldeira.	Reduzir as perdas de calor da caldeira e restaurar a eficiência da caldeira.
Otimizar a taxa de descarga de vapor no desaerador.	Minimizar as perdas de calor evitáveis.

Tabela I.2 - Oportunidades de melhorar a eficiência na distribuição

OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO	DESCRIÇÃO
Consertar os vazamento de vapor.	Minimizar as perdas de calor evitáveis.
Minimizar as descargas de vapor.	Minimizar as perdas de calor evitáveis.
Assegurar que as tubulações, válvulas, conexões e tanques do sistema de vapor estejam bem isolados.	Reduzir as perdas de energia das superfícies da tubulação e dos equipamentos.
Implementar programa efetivo de manutenção dos purgadores de vapor.	Reduzir a passagem de vapor vivo para o sistema de condensado e promover uma operação eficiente de transferência de calor no equipamento de uso final do vapor.
Isolar (bloquear) as linhas de vapor fora de uso.	Minimizar as perdas de calor evitáveis e reduzir perdas de energia das superfícies das tubulações e dos equipamentos.
Utilizar turbinas de contrapressão, ao invés de válvulas redutora de pressão.	Providenciar um método mais eficiente de redução da pressão de vapor para serviços de baixa pressão.

Tabela I.3 - Oportunidades de melhorar a eficiência na recuperação

OPORTUNIDADES NA RECUPERAÇÃO	DESCRIÇÃO
Otimizar a recuperação de condensado.	Recuperar a energia térmica do condensado e reduzir a quantidade de água de alimentação adicionada ao sistema, economizando energia e produtos químicos de tratamento.
Usar o condensado de alta pressão para produzir vapor de baixa pressão.	Explorar a energia disponível no condensado retornável.

A Tabela I.4 resume as oportunidades de economia de energia identificadas e está baseada em auditorias realizadas em 62 instalações industriais de caldeira com um consumo de gás natural de aproximadamente 500 bilhões de litros/ano.

Tabela I.4 - Oportunidades de economizar em sistema de vapor

ÁREAS PARA MELHORIA	COMBUSTÍVEL ECONOMIZADO
Combustão	1,6 %
Projeto da instalação da caldeira	2,0 %
Recuperação de calor	3,0 %
Mudanças operacionais	2,8 %
Vapor e sistema de retorno de condensado	1,6 %
Redução de Pressão	2,0 %
Sistema de distribuição	5,8 %
TOTAL	18,8 %

2.2 - Oportunidades de melhoria em sistema de vapor específico da sua empresa

Com o objetivo de identificar oportunidades de economizar combustível e de melhorar a qualidade do sistema de vapor, sugerem-se que os seguintes passos sejam obedecidos:

- a)** Obter os índices de referência (benchmarks). Os principais são: custo unitário de produção do vapor, eficiência da caldeira e necessidade de energia do produto final. Estes índices podem ser de valores históricos ou de outras empresas com processo semelhante. Cuidado com as condições de contorno, como pressão do vapor, faixa de temperatura, porte da instalação, tipo de tecnologia empregada e condições ambientais. Documentar bem esta etapa, inclusive com fotos.
- b)** Estabelecer metas de redução. Não estabeleça metas para valores absolutos; isto é, não se deve procurar reduzir kWh ou kcal, mas sim kWh/t processada, kcal/R\$ faturado, etc.
- c)** Identificar as oportunidades de melhoria (para obtermos mais detalhes, consulte a parte II deste Manual).

Na procura de oportunidades por equipamento, processo ou área, as questões seguintes devem estar na mente da equipe:

- Vapor é a melhor opção? Há alternativas mais econômicas?
- Posso realizar aquela atividade com menos vapor?
- Posso diminuir a quantidade ou o tempo de utilização?

- d) Estabelecer as ações necessárias para converter uma oportunidade identificada em melhoria concreta ou realizada.
- e) Levantar a relação custo/benefício para cada ação. Considerar custos de investimento, de manutenção e operacionais, assim como ciclo de vida da medida. Comparar com os benefícios tangíveis (redução de custos de energia, insumos e mão-de-obra) e qualitativos (impacto ambiental, melhoria da imagem, maior conforto e mais segurança).
- f) Selecionar as ações a serem priorizadas. Inicialmente, estabelecer critérios e pré-requisitos, compatíveis com a realidade da empresa, tais como: disponibilidade de recursos, prazo de implantação, influência sobre a produção ou serviço prestado e "patrocinadores". Classificar ações em de pouco, médio ou alto investimento; com ou sem parada de produção; curto, médio ou longo prazo; abrangência (no uso final, na distribuição, recuperação e/ou na geração); aquelas que podem ser desenvolvidas por equipe própria ou por terceiros; complexas ou não; baixo ou alto impacto. A partir dos critérios e classificações, priorizar e escolher as ações/medidas que serão implementadas, primeiramente.

3

IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DEFINIDAS

3.1 - Implementação de melhorias em um sistema de vapor genérico

Como referência para a implementação de melhorias, podem-se estudar casos publicados na literatura ou consultar os fornecedores de equipamentos e/ou componentes a serem utilizados sobre as melhores práticas a serem adotadas.

3.2 - Implementação de melhorias no sistema de vapor específico da sua empresa

- a) Planejar todas as atividades necessárias.
- b) Confirmar a disponibilidade de recursos (materiais, financeiros, humanos e de tempo).
- c) Implementar a medida.
- d) Documentar as atividades e custos.
- e) Medir as melhorias obtidas (medir o sucesso da implantação). Do mesmo modo que no início, fazer o levantamento dos dados da nova situação e estabelecer novos índices e

rendimentos. Ajustar os índices para as condições atuais, caso elas tenham se modificado ao longo da implantação da medida (aumento de produção, novos produtos ou serviços, época do ano, etc.).

f) Comparar com a meta estabelecida; justificar ou ajustar não conformidades.

g) Corrigir as dificuldades que surgiram.

4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E REINÍCIO DO CICLO DO PLANO DE AÇÕES

O resultado de qualquer ação implementada deve ser avaliado, e seu impacto no sistema deve ser analisado. Determinar se a ação já pode ser considerada concluída e reiniciar o ciclo do Plano de Ação para outras oportunidades identificadas.

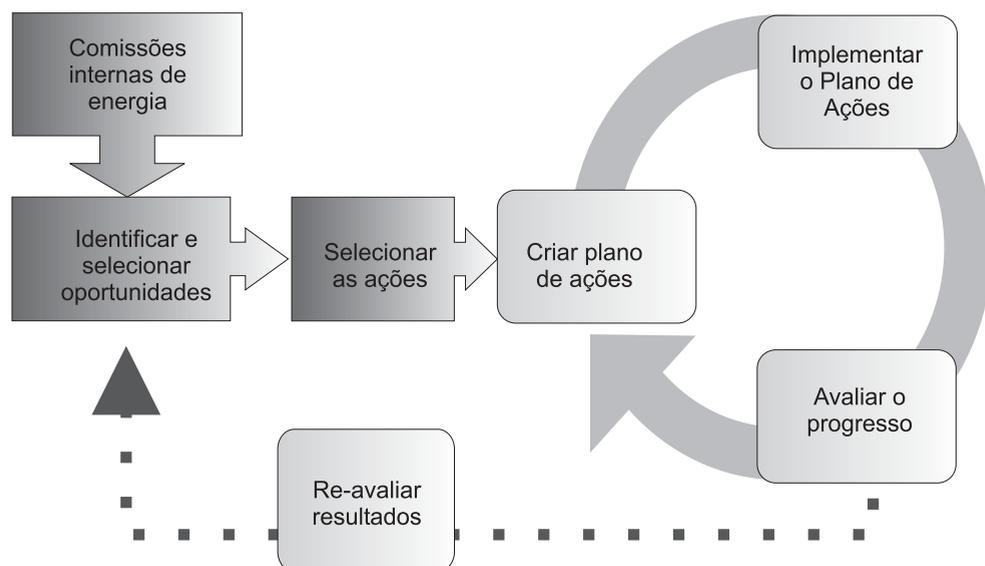


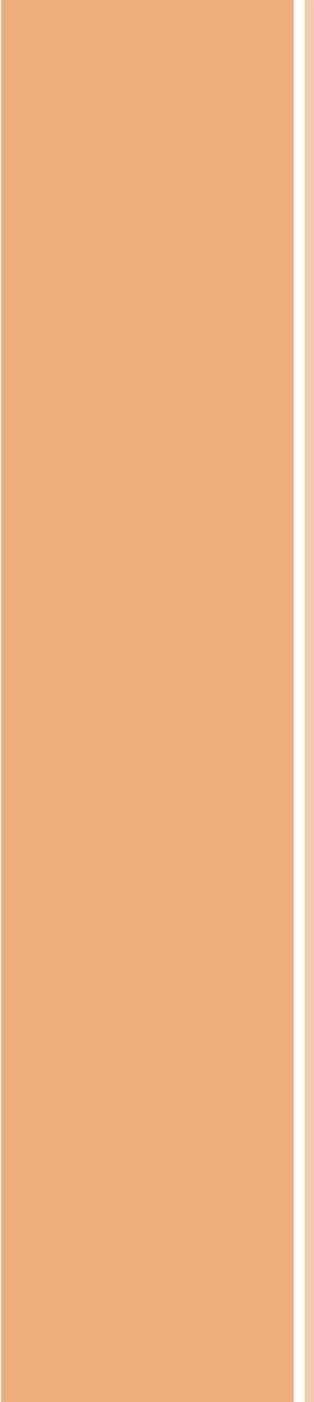
Figura I.3 - Ciclo de implementação do plano de ação

Antes de atuar na geração, recomenda-se priorizar as ações de melhorias na utilização final do vapor, atuando na necessidade de energia do produto final e nos sistemas de distribuição, nessa ordem, pois os ganhos nestas áreas serão refletidos de modo ampliado na geração. Caso contrário, corre-se o risco de a geração ficar superdimensionada.

Resumo do Plano de Ação de acordo com a abordagem sistêmica ("systems approach")

A abordagem sistêmica analisa ambos os lados do sistema - a demanda e o fornecimento - e o modo como se interagem, essencialmente, transferindo o foco dos componentes individuais para a atenção no desempenho global do sistema. Muitas vezes, os operadores estão tão focados nas demandas imediatas dos equipamentos que não têm conhecimento de como os parâmetros do sistema afetam o equipamento. Similarmente, a abordagem comum da engenharia consiste em explodir (subdividir) o sistema em seus componentes básicos ou módulos, otimizar a escolha (seleção) ou projeto destes componentes e, então, montar estes componentes para formar o sistema. Uma vantagem desta abordagem é que ela simplifica os problemas. Entretanto, uma desvantagem é que freqüentemente negligencia a interação entre estes componentes. De outro lado, a abordagem sistêmica avalia o sistema de forma global, para determinar como as necessidades de uso final podem ser mais efetivamente e eficientemente servidas.

O aperfeiçoamento e a manutenção do sistema de ar comprimido no seu melhor desempenho requerem não somente a atenção aos componentes individuais, mas também a análise de ambos os lados do sistema, do suprimento e da demanda assim como o modo como eles interagem. A aplicação da abordagem sistêmica usualmente envolve os tipos de ações relacionadas nesta parte do Manual.



PARTE II
**OPORTUNIDADES DE
MELHORAR A EFICIÊNCIA**

PARTE II - OPORTUNIDADES DE MELHORAR A EFICIÊNCIA

Para identificar as oportunidades de melhorar a eficiência energética e o desempenho econômico de sistema de vapor, este Manual sugere que a seguinte metodologia seja seguida:

1

IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE VAPOR

A abordagem sistêmica analisa ambos os lados do sistema, o da demanda e o do fornecimento, bem assim o modo como eles se interagem, essencialmente transferindo o foco dos componentes individuais para o desempenho global do sistema. Muitas vezes, os operadores estão tão focados nas demandas imediatas dos equipamentos que negligenciam a noção de como os parâmetros do sistema afetam o equipamento. Similarmente, a abordagem comum da engenharia consiste em explodir (subdividir) o sistema em seus componentes básicos ou módulos, otimizar a escolha (seleção) ou projeto destes componentes e, então, montar estes componentes para formar o sistema. Uma vantagem desta abordagem é que ela simplifica os problemas. Entretanto, uma desvantagem é que freqüentemente negligencia a interação entre estes componentes. De outro lado, a abordagem sistêmica avalia o sistema de forma global para determinar como as necessidades de uso final podem ser mais efetivamente e eficientemente servidas.

A abordagem sistêmica também reconhece que a eficiência, a confiabilidade e o desempenho do sistema estão intimamente relacionados. Por exemplo, uma perda de eficiência como a de calor através das superfícies não isoladas da tubulação reduz a energia disponível para uso final e exige das caldeiras maior esforço para atender a mesma demanda. Muitas vezes, a perda de energia cria um estresse adicional no sistema que acelera o desgaste e pode criar cargas para os quais o sistema não foi originalmente projetado.

1.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na geração 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. A eficiência pode ser calculada 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:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_{vs} - h_{ae})}{\dot{m}_c \cdot PCI}$$

em que:

- \dot{m}_v - vazão em massa de vapor (kg/h);
- \dot{m}_c - vazão em massa de combustível (kg/h);
- h_{ae} - entalpia da água na entrada (kJ/kg);
- h_{vs} - entalpia do vapor de saída (kJ/kg); e
- PCI - poder calorífico inferior do combustível queimado (kJ/kg).

Como se pode verificar, são os fatores ou variáveis \dot{m}_v ; \dot{m}_c ; h_{vs} ; h_{ae} e PCI que afetam a eficiência da caldeira na geração de vapor. Um estudo, utilizando uma abordagem sistêmica sobre como estes fatores estão relacionados às condições operacionais da caldeira pode revelar informações importantes para a identificação de oportunidades de melhorias da eficiência da caldeira.

Como o objetivo da geração de vapor é atender à demanda de vapor requerida pelo sistema de uso final na quantidade e qualidade necessária para aplicação em seus processos, pode-se exemplificar como estes fatores estão relacionados às condições de operação da caldeira a partir da demanda.

- Vazão em massa de vapor (\dot{m}_v) - representa a quantidade de vapor produzido (kg/h) pela caldeira. Depende diretamente da demanda de vapor (sistema de uso final) e indica o nível de carga da caldeira.
- Vazão em massa de combustível (\dot{m}_c) - representa a quantidade de combustível consumido (kg/h) pela caldeira para produzir (\dot{m}_v). Depende diretamente do poder calorífico inferior do combustível queimado (PCI), que representa uma qualidade do combustível.
- Entalpia do vapor na saída da caldeira (h_{vs}) - representa a energia térmica (kJ/kg) contida no vapor. É uma qualidade do vapor gerado, que está diretamente relacionada com a pressão e a temperatura de trabalho da caldeira, bem assim com o projeto da caldeira (vapor saturado ou vapor superaquecido).
- Entalpia da água na entrada da caldeira (h_{ae}) - representa a energia térmica (kJ/kg) contida na água de alimentação da caldeira. Depende da temperatura da água (°C).
- Poder calorífico inferior do combustível queimado (PCI) - representa a energia contida no combustível (kJ/kg) que pode ser transferida ao vapor e depende do tipo de combustível utilizado e da umidade do combustível.

A partir das informações acima expostas, podem-se levantar as seguintes premissas:

- Quanto maior a demanda de vapor, maior será a produção, aumentando a carga de trabalho da caldeira e a quantidade de combustível queimado e de água consumida.
- Quanto maior a pressão e/ou temperatura do vapor, maior será sua entalpia (energia), requerendo mais combustível para produzir uma mesma quantidade de vapor.
- Quanto mais alta a temperatura da água, menos energia será necessária para produção do vapor.
- A quantidade de água consumida está diretamente relacionada à quantidade de vapor produzido mais as perdas (descarga de fundo, vazamentos etc.).
- Etc.

Exemplo de utilização da abordagem sistêmica para analisar o efeito combinado de vários fatores no resultado global de eficiência da caldeira.

- A eficiência da caldeira está relacionada com a quantidade de energia que a caldeira transfere do combustível para o vapor. Para que esta transferência ocorra, há a necessidade de superfícies de troca térmica, que é um parâmetro de projeto da caldeira. Assim, o tamanho destas superfícies tem um limite definido, que, por sua vez, define a quantidade de energia a ser transferida para produção de vapor. Com isso, se a produção de vapor continuar a aumentar além da carga máxima projetada para a caldeira, a eficiência cairá drasticamente, pois mesmo queimando mais combustível a quantidade de calor transferida é limitada, resultando em maior consumo de combustível por quantidade de vapor produzido.

A eficiência também pode ser analisada a partir das perdas que ocorrem no sistema de geração:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f}$$

Esta equação pode também ser apresentada da seguinte forma:

$$\eta = 1 - \left[K + \frac{\lambda (a/c + 1) c_p \cdot (T_{CH} - T_{Ref})}{PCI} \right]$$

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;

a/c - relação ar/combustível estequiométrica;

C_p - calor específico médio entre as temperaturas T_{CH} e $T_{Ref.}$;

T_{CH} - temperatura dos gases na chaminé;

T_R - temperatura de referência adotada; e

PCI - poder calorífico inferior do combustível.

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

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

em que:

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

c_{P_i} - 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 termos de cálculos práticos, considera-se que grande parte dos gases é constituída de nitrogênio atmosférico. A equação anterior pode ser substituída, sem incorrer em grandes erros, por:

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 ao vapor presente na chaminé serão abordadas no item **Perdas associadas à umidade do combustível**.

Também fazem parte da perda pela chaminé as perdas associadas à presença de monóxido de carbono e fuligem nos gases de combustão. Estas perdas, 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.

- **Perdas por radiação e convecção.** A determinação das perdas por radiação e convecção pelo custado das caldeiras é, geralmente, difícil de avaliar, devido às diversas e complexas medições necessárias para sua obtenção. Existe uma metodologia desenvolvida pela ASME que pode facilitar este cálculo. De maneira geral, pode-se adotar que estas perdas variam de 1% a 10% da energia fornecida, sendo que as perdas de maior valor são para equipamentos de menor porte, operando em cargas parciais.
- **Perdas por descarga de fundo (purga ou "blowdown").** Esta parcela está relacionada com a perda de energia causada pelo fluxo de água retirada na descarga, realizada para manter a concentração de sais na água dentro da caldeira em níveis toleráveis, sendo dada por:

$$P_p = m_p \cdot c_{Pa} (T_p - T_{Ref})$$

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).

- **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 por meio da equação abaixo (em kJ/kg de combustível), em que o valor 1170 representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas.

$$P_{TC} = m_R \cdot 1170$$

em que:

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

- **Perdas associadas ao combustível não convertido presente nas cinzas.** Para obter-se o valor exato desta perda seria necessário um ensaio para determinar-se o poder calorífico da mistura de cinzas e 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 apresentada em seguida, em que o valor 33.780 representa um poder calorífico.

$$P_{CC} = m_C \cdot 33780$$

em que:

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

- **Perdas associadas à umidade do combustível.** Essas perdas são importantes quando a umidade do combustível é alta, caso típico da lenha e do bagaço de cana. Uma parte do calor fornecido é usada para aquecer e transformar em vapor a água presente no combustível. Quando os cálculos são feitos com o PCS do combustível, soma-se a essa perda a parcela utilizada para transformar em vapor a água que é formada na reação de combustão. No presente Manual, usa-se o PCI e essa energia não precisa ser considerada. Desse modo, as perdas associadas à presença de vapor na chaminé podem ser calculadas por:

$$P_v = m_v \cdot (4,186 \cdot (100 - T_{REF}) + c_{PV} \cdot (T_{CH} - 100) + h_{LV})$$

em que:

m_v - vazão mássica total de vapor na saída da chaminé (kg/kg de comb);

T_{REF} - temperatura de referência (°C);

c_{PV} - calor específico médio do vapor entre T_{CH} e T_{Ref} (kJ/kg °C); e

T_{CH} - temperatura dos gases na chaminé (°C).

1.2 - Áreas de oportunidade para melhorar a eficiência na geração

A produção de vapor é, basicamente, um processo no qual a energia do combustível é convertida em energia contida no vapor. As caldeiras são os componentes mais intensivos em energia no sistema de vapor. Isto implica que o gerenciamento da energia deve ter foco na caldeira. Muitos fatores são ingredientes chaves no desempenho da caldeira.

Tipicamente, as perdas mais significativas associadas à operação da caldeira estão na energia perdida nos gases de exaustão da chaminé. Esta perda é diretamente influenciada pela temperatura dos gases de exaustão e pela quantidade de excesso de ar fornecido ao processo de combustão.

Fatores adicionais que afetam o desempenho da caldeira devem ser considerados. A descarga de fundo é essencial para a operação contínua de qualquer caldeira de vapor, sendo também uma fonte de perda para a operação da caldeira. Em grande escala, estas perdas podem ser gerenciadas e reduzidas. Perdas de calor no costado da caldeira também

são uma área de gerenciamento de perda em potencial.

1.2.1 - Redução de perdas nos gases da chaminé

As perdas de calor dos gases de exaustão são os maiores componentes de perdas associadas com a operação da caldeira. Muitos fatores estão incorporados nesta categoria de perda, mas os maiores contribuintes são: a temperatura de saída dos gases e a quantidade de excesso de ar. Raramente estas perdas combinadas são inferiores a 8% do total da energia do combustível e geralmente o resultado é superior a 15%.

As perdas de calor nos gases da chaminé são normalmente determinadas pela análise da combustão. Estas análises baseiam-se nos princípios da combustão, sendo os principais dados de entradas ou medidas: a temperatura e o teor de oxigênio nos gases da chaminé e a temperatura ambiente.

As perdas nos gases na chaminé requerem um gerenciamento mais rigoroso. A avaliação das perdas na chaminé pode ser separada em duas categoriais principais: (1) efeito da temperatura; e (2) efeito do excesso de ar.

A eficiência da caldeira depende diretamente da temperatura dos gases na chaminé, que é um indicativo da eficiência da transferência de calor dos gases para o vapor. Assim, a temperatura de saída dos gases pode ser afetada por muitos fatores: (a) carga da caldeira; (2) projeto da caldeira; (3) sujeira na superfície de transferência de calor lado combustão; (4) sujeira na superfície de transferência de calor lado d'água; (5) passagem direta de gases de exaustão devido à falha de componentes da caldeira; e (6) excesso de ar.

- **Carga da caldeira.** A temperatura de saída dos gases da chaminé é afetada pela carga da caldeira (produção de vapor). Quando ela aumenta, a temperatura de saída dos gases da chaminé normalmente aumenta. Isto é inicialmente causado pelo tamanho da superfície de transferência de calor dentro da caldeira ser fixo, o que permite que menos calor seja transferido por unidade de massa dos produtos de combustão quando a carga aumenta.

Temperatura elevada é um indicativo de perda elevada. As perdas pelo costado (carga, envoltório) aumentam em magnitude, mas reduzem em termos de percentual do total de energia utilizada. Trabalhar a caldeira com baixa carga reduz a temperatura, mas aumentam em percentual as perdas pelo costado, além do que, nessa condição, aumenta-se o excesso de ar e, conseqüentemente, as perdas pelos gases da chaminé. Assim, muitas caldeiras não experimentarão melhorias na eficiência quando a carga for reduzida.

Muitas caldeiras experimentam um aumento desproporcional da temperatura quando a caldeira opera com carga maior superior a 100% da carga nominal (projetada). Isto, que pode resultar em perdas significativas, é o principal componente que leva à redução na eficiência de caldeiras operando acima de 100% da carga plena.

Em resumo, a carga da caldeira geralmente afetará a temperatura de exaustão do gás da chaminé. Este efeito é, essencialmente, uma característica de projeto da caldeira, e pouco se pode fazer a respeito. O ponto principal está em reconhecer que a temperatura do gás da chaminé muda em função da carga da caldeira e em levar em conta esta variação ao avaliar a degradação do desempenho. Conseqüentemente, a temperatura do gás da chaminé deve ser registrada com respeito à carga da caldeira, bem como a temperatura ambiente, para permitir uma comparação apropriada da operação da caldeira.

- **Projeto da caldeira.** O projeto de uma caldeira é ponto chave para assegurar a eficiência global da geração do vapor. A área de transferência de calor e as outras considerações do projeto são fatores importantes para determinar a quantidade de energia transferida do gás da chaminé. Obviamente, uma área de transferência de calor adicional contribuirá para a caldeira operar mais eficientemente (reduzindo a temperatura de exaustão dos gases da chaminé). A quantidade de área de transferência de calor é um fator de projeto que leva a conseqüências econômicas: uma superfície adicional de transferência de calor requer uma despesa adicional.

Do ponto de vista do gerenciamento de perdas, pouco pode ser feito operacionalmente para reduzir o componente do projeto da perda dos gases de exaustão depois de instalada a caldeira. Geralmente, as melhorias são obtidas com a instalação de equipamentos adicionais para a recuperação do calor. Os equipamentos mais comuns de recuperação do calor são: (1) economizador para aquecimento da água de alimentação da caldeira; e (2) pré-aquecedor de ar de combustão. Ambos equipamentos são trocadores de calor que extraem a energia do gás da chaminé. Um economizador troca o calor entre o gás de conduto e a água de alimentação antes de ser injetada na caldeira. Um pré-aquecedor de ar de combustão troca o calor entre o gás da chaminé e o ar de combustão que é injetado na caldeira.

- **Sujeira nas superfícies de troca térmica no lado combustão.** As superfícies de troca térmica, tanto do lado da água quanto do lado dos gases de combustão, devem ser mantidas limpas e com elevada taxa de transferência de calor do lado dos gases para o lado da água, retirando maior quantidade de calor dos gases, reduzindo a temperatura e contribuindo para manter elevada a eficiência.

Para melhorar a eficiência, devem-se fazer o controle adequado da combustão e a limpeza periódica da fuligem. A remoção, quando necessária, é conduzida com dispositivos especiais

e/ou sopradores de fuligem (vapor ou ar comprimido).

- **Sujeira nas superfícies de troca térmica no lado d'água.** A qualidade da água de alimentação da caldeira é fundamental para manter limpas as superfícies, evitando ou retardando a formação de incrustações e depósitos de sólidos que formam películas no lado da água das caldeiras e acarretando significativa redução da taxa de trocas térmicas. A qualidade da água é muito importante para manter elevado o rendimento da caldeira, além da proteção das superfícies metálicas contra a corrosão. Assim, a contribuição do sistema de tratamento de água de alimentação da caldeira deve ser seriamente levado em conta na melhoria de eficiência da caldeira.

Quando há formação de incrustações e depósitos, pode-se utilizar remoção química e/ou limpeza mecânica, dependendo do tipo de caldeira e da facilidade de acesso. Mesmo nas pequenas caldeiras, a prevenção de formação de incrustações pode produzir substancial economia de energia. O depósito de incrustações ocorre quando cálcio, magnésio e sílica, comumente presentes na água captada, reagem para formar uma camada contínua de material no lado da água dos tubos trocadores de calor da caldeira.

As incrustações criam um problema, pois possuem uma condutividade térmica muito menor que a do metal dos tubos. Mesmo em finas camadas, comportam-se como isolante efetivo, reduzindo a transferência de calor. O resultado é o superaquecimento do metal do tubo. O tubo se degrada e perde eficiência energética. A perda de combustível devido a incrustações pode ser de 2% para as caldeiras aquatubulares e de até 5% para as caldeiras flamotubulares.

- **Monitoramento da temperatura dos gases da chaminé.** Um indicador indireto da formação de depósitos de incrustações é a temperatura dos gases da chaminé. Se a temperatura dos gases da chaminé subir (com a carga e o excesso de ar mantidos constantes), isso se dá, possivelmente, devido à presença de incrustações.
- **Execução de inspeção visual.** Inspeccionar visualmente os tubos da caldeira quando a unidade está desligada para a manutenção. A remoção de incrustações pode ser obtida por meios mecânicos ou pela limpeza ácida. Se as incrustações persistirem, consulte um especialista para o tratamento de água e considere a conveniência de modificar seu tratamento da água de alimentação ou a programação de adição dos produtos químicos.
- **Passagem direta de gases de exaustão devido à falha de componentes da caldeira.** As caldeiras são projetadas com os trajetos específicos para que os gases de combustão passem completamente pelas superfícies de troca de calor. Estes trajetos são fornecidos pelos defletores internos, que podem falhar. Se um componente falhar, pode resultar em perda significativa. Obviamente, um componente interno defeituoso deve ser reparado. Entretanto, somente o valor da perda econômica ditará se a caldeira deve ser desligada imediatamente para exame ou ser reparada durante uma parada programada.

Por isso, é importante o monitoramento da temperatura dos gases da chaminé e das condições de carga.

1.2.2 - Redução do nível de excesso de ar e melhoria da eficiência da combustão

A operação da caldeira no nível ótimo de excesso de ar minimizará a perda de calor nos gases da chaminé e melhorará a eficiência da combustão. A eficiência da combustão é uma medida de como o índice de calor de um combustível transforma-se eficazmente em calor útil. A temperatura e a concentração de oxigênio (ou de dióxido de carbono) dos gases da chaminé são indicadores preliminares da eficiência da combustão.

Em uma mistura completa, uma quantidade precisa ou estequiométrica de ar é necessária para reagir completamente com uma dada quantidade de combustível. Na prática, as condições da combustão nunca são ideais, e um excesso de ar deve ser fornecido para a queima completa do combustível.

A quantidade correta de ar adicional é determinada pela análise das concentrações de oxigênio ou de dióxido de carbono nos gases da chaminé. Níveis baixos de excesso de ar resultam em combustíveis não queimados (combustível, fuligem, fumo e monóxido de carbono). Quando forem altos, resultarão em perda de calor, devido ao aumento do fluxo de gás da chaminé, diminuindo a eficiência global de transferência da energia do combustível para o vapor. A Tabela II.1 relaciona algumas medidas do nível de excesso de ar com o desempenho da caldeira.

Tabela II.1 - Eficiência de combustão para o gás natural

EXCESSO %		EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO				
		Temperatura do gás da chaminé menos a do ar de combustão (°C)				
Ar	Oxigênio	95	150	205	260	315
9,5	2,0	85,4	83,1	80,8	78,4	76,0
15,0	3,0	85,2	82,8	80,4	77,9	75,4
28,1	5,0	84,7	82,1	79,5	76,7	74,0
44,9	7,0	84,1	81,2	78,2	75,2	72,1
81,6	10,0	82,8	79,3	75,6	71,9	68,2

Em sistemas bem projetados para queima de gás natural, um nível de excesso de ar de 10% é atingível. Uma regra geral frequentemente adotada recomenda que a eficiência da

caldeira pode ser aumentada em 1% para cada redução de 15% no excesso de ar ou redução de 22°C na temperatura do gás da chaminé.

As caldeiras operam freqüentemente com excesso de ar em níveis acima do ótimo. Por isso, deve-se monitorar periodicamente a composição dos gases da chaminé e regular as caldeiras para manter o excesso de ar dentro do limite ótimo.

- **Instalação de analisadores de gases na chaminé.** A porcentagem de oxigênio no gás da chaminé pode ser medida de forma econômica por meio de "kits" de testes de absorção de gás. Analisadores portáteis baseados em computador mais caros (R\$1.500,00 a R\$3.000,00) indicam a porcentagem de oxigênio, a temperatura do gás da chaminé e a eficiência da caldeira. Estes são investimentos recomendados para todo o sistema da caldeira com custos de combustível anuais que excedem a R\$150.000,00.
- **Implantação de sistema de monitoramento e controle de oxigênio nos gases de saída.** Quando a composição do combustível é altamente variável (como o gás de refinaria, combustível de biodigestores ou caldeiras multcombustíveis) ou quando os fluxos de vapor são altamente variáveis, a instalação de analisador de oxigênio em tempo real (sonda medidora de oxigênio) nos gases de saída deve ser considerada. O sistema de monitoramento do teor de oxigênio fornece uma realimentação aos controles do queimador para minimizar automaticamente o excesso de ar na combustão e otimizar a relação do ar / combustível.

1.2.3 - Recuperação de calor dos gases de escape pela utilização de economizador

O economizador é um trocador de calor destinado a elevar a temperatura da água de alimentação antes de introduzi-la no interior da caldeira. O aumento da temperatura da água é benéfico ao processo e oferece algumas vantagens, sobretudo quando se aproveita o calor sensível ainda disponível nos gases de combustão, após a sua passagem pela caldeira. A introdução de água fria, em torno de 25°C, tende a provocar uma queda de pressão interna da caldeira, principalmente quando o processo de recuperação do nível se faz intermitentemente. A água ingressando na caldeira com temperaturas próximas à da vaporização faz atenuar os efeitos, e o regime de pressão de trabalho permanece mais estável. Acumulando as vantagens anteriores, registra-se um aumento na eficiência térmica do equipamento.

O projeto da caldeira pode estabelecer uma temperatura de saída dos gases de escape da ordem de 260 a 280°C, representando um rendimento em torno de 87 a 88%. A inclusão de um economizador poderia elevar este rendimento para 90 a 91%. A aplicação prática desta possibilidade, entretanto, encontra objeções no custo do equipamento, que pode estar

sujeito a corrosão, devido à condensação de gases ácidos. Para unidades com pressão de operação mais elevadas, esta situação se altera, com as temperaturas de saída dos gases de combustão após a caldeira podendo atingir valores de 360°C a 400°C, principalmente quando as pressões de operação ultrapassam o valor de 35 kgf/cm².

Sugestões:

- Determine a temperatura dos gases de escape após a caldeira ser ajustada às especificações do fabricante. A caldeira deve operar com níveis de excesso de ar próximo ao ótimo e com todas as superfícies de transferência de calor limpas.
 - Determine a temperatura mínima a que os gases podem ser resfriados, submetidos a critérios tais como o ponto de orvalho, a corrosão da extremidade fria e a superfície econômica de transferência de calor.
 - Estude o custo efetivo da instalação um economizador para aquecer a água de alimentação ou um pré-aquecedor para aquecer o ar de combustão em sua caldeira.
- **Limites de temperatura para gás de exaustão.** A menor temperatura que os gases de exaustão na chaminé podem ser resfriados depende do tipo de combustível usado: 120°C para o gás natural, 150°C para carvão e óleos combustíveis de baixo teor de enxofre e 180°C para óleos de combustível elevados teores do enxofre. Estes limites são ajustados para prevenir a condensação dos gases e possíveis corrosões.

Aplicações potenciais para um economizador - O economizador aquece a água de alimentação da caldeira, recuperando o calor dos gases. Este equipamento é apropriado quando a superfície de transferência de calor existente dentro da caldeira é insuficiente para remover o calor de combustão. As grandes caldeiras, operando nas pressões acima de 6 kgf/cm² ou mais e que trabalham significativamente a plena carga por muito tempo são excelentes candidatas ao aperfeiçoamento com a colocação de um economizador.

1.2.4 - Recuperação de calor dos gases de escape usando pré-aquecedor de ar

Aquecedores de ar são aparelhos trocadores de calor que podem utilizar os gases quentes de escape para elevar a temperatura do ar de combustão antes de injetá-lo na fornalha. O pré-aquecedor de ar, normalmente, é instalado no circuito de escoamento de gases da própria caldeira.

Os pré-aquecedores de ar são equipamentos que reduzem a temperatura dos gases que deixam a caldeira, melhorando desta forma a sua eficiência térmica. De maneira geral, a redução para cada 20°C na temperatura dos gases de escape significa um aumento de 1% na eficiência térmica do sistema de geração de vapor.

Além de reduzir o consumo de combustível, este equipamento melhora sensivelmente a qualidade da combustão, com a diminuição do excesso de ar e o conseqüente aumento da temperatura da câmara de combustão e maior estabilidade da chama.

Uma das vantagens mais acentuadas proporcionada pela injeção de ar quente é na queima de combustíveis sólidos úmidos.

Nota:

Os gases de escape também podem ser utilizados na secagem de combustíveis sólidos úmidos particulados, principalmente biomassa (bagaço de cana e cavaco de madeira).

1.2.5 - Redução de perdas de calor por radiação e convecção (perda no envoltório da caldeira)

As perdas no envoltório (costado) são categorizadas como de transferência de calor (radiação e convecção) da superfície externa da caldeira. Uma determinação de perdas previstas da radiação e de convecção pode ser obtida da Associação Americana dos Fabricantes da Caldeira, que fornece dados sobre as perdas do escudo associadas com as caldeiras.

De modo geral, a maioria das caldeiras aquotubular tem menos que 1,0% de perda no envoltório, quando relacionada à quantidade total de energia do combustível, se a caldeira estiver operando próximo da carga plena. Esta é uma perda previsível se não houver nenhum problema com os refratários ou com a isolamento externa da caldeira. O valor da perda do envoltório (em kcal/h) não muda apreciavelmente com relação à carga da caldeira. Em conseqüência, se esta perda for considerada como um percentual da energia do combustível, a perda percentual aumenta quando a carga da caldeira diminui.

As caldeiras piro-tubular, tipicamente, têm percentual de perda no envoltório muito menor que as caldeiras aquotubular de capacidade equiparável. Em geral, isto ocorre porque o envoltório externo de uma caldeira do piro-tubular geralmente está em contato térmico com água fervendo (temperatura relativamente baixa), melhor que nos gases de combustão em temperaturas elevadas. Conseqüentemente, espera-se que a perda no envoltório em uma caldeira piro-tubular seja menor que a de uma caldeira aquotubular típica de mesma capacidade da produção do vapor.

1.2.6 - Recuperação de calor da descarga de fundo (blowdown)

À medida que a caldeira produz vapor, acumulam-se os sais minerais, que penetram no seu interior com a água de reposição. A concentração excessiva desses sais e a conseqüente formação de incrustações nas instalações a jusante da caldeira comprometem o funcionamento eficiente de todo o sistema. Em muitas caldeiras, principalmente as de menor porte, é suficiente instalar uma válvula de descarga rápida (válvula de fundo de caldeira) para se obter a extração de lodo e sais. Mas as caldeiras de maior porte requerem um dispositivo adicional para a dessalinização contínua e a automatização da válvula de descarga periódica.

A extração periódica de lodo e a dessalinização contínua são procedimentos de importância vital para o funcionamento perfeito de caldeiras de vapor. A dessalinização contínua mantém a densidade da água na caldeira dentro dos limites admissíveis. Já a extração periódica do lodo serve para conservar o fundo da caldeira livre do lodo, microorganismos e outras impurezas que aí se acumulam. Na maioria dos casos, é necessário adotar ambos os sistemas para se obter a otimização de rendimento e a segurança das instalações.

Mesmo quando a água de alimentação da caldeira for inteiramente abrandada e desmineralizada, é recomendável instalar válvulas de descarga periódica e de dessalinização contínua, pois qualquer falha nos equipamentos de tratamento da água ou em seus acessórios pode provocar a entrada de água não tratada na caldeira.

A continuidade dos processos de vaporização e reposição de água acarreta aumento de concentração de impurezas na caldeira. Para evitar a conseqüente formação de incrustações nas suas paredes, adicionam-se determinados produtos químicos a água que modificam a constituição de certas impurezas, dando origem a partículas que se depositam no fundo da caldeira em forma de lodo. A mistura desse lodo com o oxigênio e gás carbônicos exerce ação corrosiva, danificando as paredes dos tubos da caldeira ou destruindo-os. O acúmulo progressivo das incrustações pode provocar tensões térmicas capazes de fender as paredes da caldeira ou rachar os rebites. Se as camadas de lodo atingirem os tubos, as tensões térmicas podem ser agravadas pela conseqüente retenção de calor, causando a destruição do tubo.

A descarga de fundo é essencial para a operação contínua de toda a caldeira de vapor. Porém, esta é uma fonte de perda de energia da caldeira. A redução da perda associada com a descarga de fundo da caldeira é obtida de duas formas. Primeiramente, as taxas de descarga são reduzidas com a melhoria da qualidade da água de alimentação, principalmente o aprimoramento do tratamento da água para a redução do teor de sólido dissolvido. A segunda forma concentra-se em recuperar a energia residente na água da descarga de fundo.

O calor perdido na descarga de fundo da caldeira pode ser recuperado com um trocador de calor, um tanque de re-evaporação ou ambos. A redução da pressão em um tanque de re-evaporação permite que uma parcela da descarga de fundo seja convertida em vapor de baixa pressão. Este vapor de baixa pressão é usado mais tipicamente nos desaeradores. A água do dreno do tanque de re-evaporação é distribuída através de um trocador de calor.

1.2.7 - Redução das perdas de calor associadas à umidade do combustível

É muito importante, particularmente para o caso de biomassas, que a umidade do combustível empregado para a geração de vapor seja a mais baixa possível. A lenha recém-cortada e o bagaço saído das moendas apresentam cerca de 50% de umidade - portanto, a água constitui metade da massa do combustível. A evaporação dessa umidade vai consumir grande parte do calor liberado na combustão. Por isso, recomenda-se utilizar combustível seco. A aplicação do programa CRC (consultar CD anexo) permite avaliar o impacto da adoção de um secador no rendimento de uma caldeira.

Influência da umidade no PCI do combustível - A presença de umidade nos combustíveis sólidos provoca a queda do poder calorífico, pois a água precisa ser evaporada pelo próprio combustível, subtraindo calor do processo de combustão, como indicado na Tabela II.2.

Tabela II.2 - Influência da umidade da lenha no PCI e do tempo na umidade

UMIDADE (%)	PCI [kcal / kg]	UMIDADE (%)	PCI [kcal / kg]	UMIDADE DA LENHA DE EUCALIPTO	
				(dias após)	(%)
0	4438,3	45	2171,1	No corte	45
5	4186,4	50	1919,2	30	36 %
10	3934,5	55	1667,3	60	30 %
15	3682,6	60	1415,3	90	27 %
20	3430,7	65	1163,4	120	25 %
25	3178,8	70	911,5	150	23 %
30	2926,8	75	659,6		
35	2674,9	80	407,7		
40	2423,0	85	155,8		

1.3 - Exemplos

1.3.1 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Direto

Determinar o rendimento de uma caldeira que produz 5.400 kg/h de vapor saturado a pressão manométrica de 12,0 kgf/cm². Sabe-se que foram realizadas medições de consumo

de óleo combustível, do tipo 2A, o que resultou em um valor médio de 468 kg/h. No caso da temperatura da água de alimentação, o valor médio encontrado foi de 61°C.

Solução:

Como são conhecidos os valores das vazões de vapor e combustível, a pressão do vapor, o tipo de combustível e as condições da água na entrada da caldeira, pode-se utilizar o Método Direto para o cálculo do rendimento, ou seja:

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot PC} \cdot 100$$

em que:

- η_{MD} - eficiência pelo método direto (%);
- 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).

- a) Usando-se uma tabela das propriedades termodinâmicas do vapor d'água saturado, com a entrada pelas pressões, verifica-se que para 13 bar abs. (considera-se a pressão atmosférica igual a 1,0 bar), corresponde um vapor saturado com entalpia igual a 2.785,18 kJ/kg.
- b) Também em tabelas termodinâmicas, determina-se a entalpia da água de alimentação. Nesse caso, uma temperatura de 61°C corresponde a uma entalpia de 253,67 kJ/kg.
- c) O valor do poder calorífico do combustível usado na caldeira pode ser obtido com o fornecedor do combustível ou então por meio de tabelas. O valor adotado para o presente caso é igual a 39.960 kJ/kg.
- d) Basta agora substituir os valores dados e os retirados das tabelas na equação apresentada anteriormente. Observa-se que as vazões foram introduzidas com seus valores em kg/h, pois suas unidades se cancelam, e que não foi necessária a conversão para kg/s.

$$\eta_{MD} = \frac{5400 \cdot (2785,18 - 253,67)}{468 \cdot 39960} \cdot 100 = 73,10 \%$$

O valor encontrado é um pouco abaixo do que poderia se esperar para caldeiras desse porte, em que os rendimentos normalmente estão na faixa de 80%.

1.3.2 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Direto

Refazendo o exemplo anterior, considerando, no entanto, que seja produzido vapor superaquecido a 40 bar e temperatura de 350°C, e que a temperatura água de alimentação seja igual a 80°C.

Solução:

Será utilizada a planilha CRC para a determinação do rendimento de caldeiras, usando-se o Método Direto. O procedimento para o preenchimento da planilha está apresentado, passo a passo, a seguir:

- a) Abrir a aplicativo CRC, Cálculo de Rendimento Caldeiras. Assegurar que as macros sejam ativadas, como pede a tela de entrada. Pressionar, na tela de início, o botão "Método Direto" (a tela para esse caso é mostrada). Caso os dados de exemplos anteriores tenham sido salvos, eles são apresentados. Pressionar o botão "Novos dados" para iniciar outros cálculos de rendimento. De forma automática, os dados serão pedidos em caixas de entrada.
- b) Escolher o tipo de vapor produzido pela caldeira. Existem três opções: vapor saturado com entrada pela pressão; vapor saturado com entrada pela temperatura; e vapor superaquecido. Em cada caso é solicitada a entrada apropriada. Na hipótese de entrada de dados equivocada ou estranha, são dados alertas ao usuário.
- c) Informar a produção do vapor. Observar as unidades empregadas.
- d) Informar a temperatura da água de alimentação.
- e) Proceder à escolha do tipo de combustível. Caso seja utilizado um tipo de combustível presente na lista de opções, não é necessário conhecer seu poder calorífico, pois o valor é retirado de uma tabela. Se o combustível for de um outro tipo, o valor do poder calorífico deverá ser informado.
- f) A última entrada de dados é a vazão do combustível. Depois desse passo, o rendimento da caldeira é calculado.

Para novos cálculos, deve-se usar o botão "Novos dados". O botão "Dados padrão" insere um conjunto de dados fixos e o botão "Menu inicial" retorna a tela de início do aplicativo (Figura II.1).

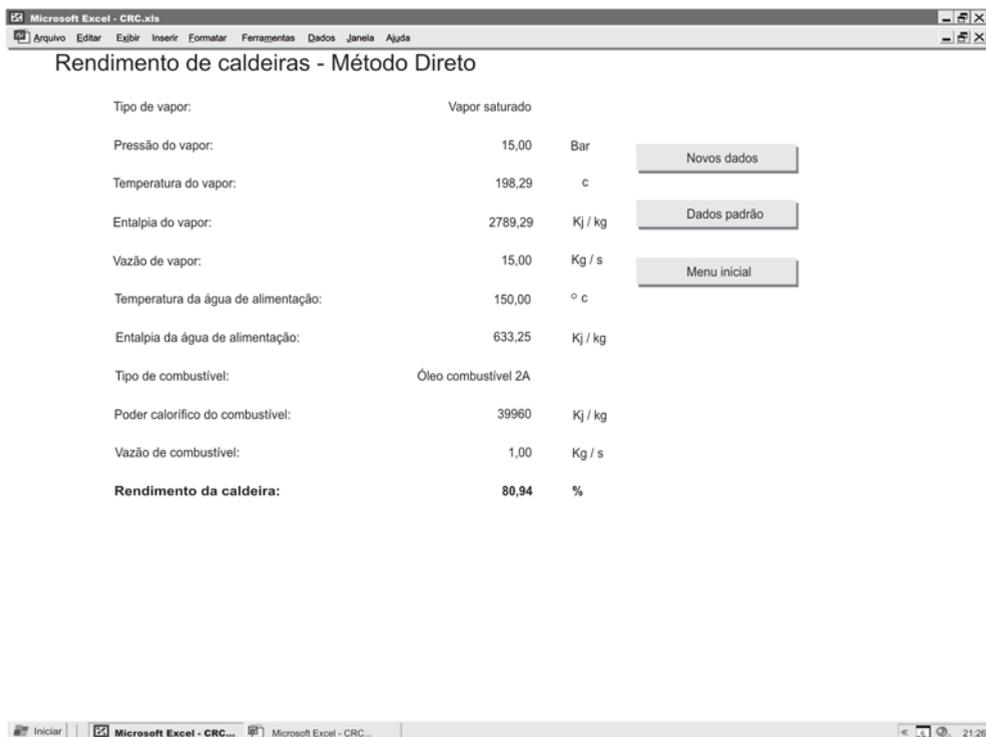


Figura II.1 - Tela do aplicativo usando o Método Direto

Esta planilha permite determinar de forma expedita o impacto de diversas alterações operacionais na geração de vapor, evidenciando seu efeito energético e econômico. Vale observar que também se pode definir a eficiência de caldeiras com base no Poder Calorífico Superior do combustível e incluir diversos outros efeitos.

1.3.3 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Indireto

Cálculo do rendimento de uma caldeira queimando bagaço de cana com 50% de umidade, para a produção de vapor com 12 bar abs. e com gases de saída à temperatura de 180°C. (Os demais dados serão fornecidos adiante.)

- a) Abrir o aplicativo CRC, Cálculo de Rendimento Caldeiras. Tomar todos os cuidados, como explicado anteriormente. Pressionar, na tela de início, o botão "Método Indireto".
- b) Escolher o tipo de combustível usado. Há seis tipos de combustível, com dados padrão,

ou escolher opção "Outro combustível". Nesse caso, deve-se informar o PCI do combustível e também entrar com a sua composição em base seca. Pode ser feita a opção por base mássica percentual ou então base molar. Para o exemplo, faz-se a escolha de número 4, "Bagaço de cana 50% de umidade".

- c) O próximo passo é entrar com o tipo de gás que foi analisado na chaminé. Há duas opções: gás carbônico (CO_2) ou oxigênio. Feita a seleção, deve-se introduzir o teor medido do gás analisado. Neste exemplo, considerou-se que o gás analisado é o gás carbônico e o teor medido é igual a 17%.
- d) Na seqüência, deve-se informar a temperatura de referência. Para o exemplo, adotou-se a referência igual a 25°C. Depois, é pedida a temperatura dos gases, 180°C.
- e) Informa-se a pressão de trabalho da caldeira. Para o caso, 12 bar abs.
- f) Neste ponto, pode ser feita a opção para o tipo de cálculo das perdas pelo costado da caldeira. O valor pode ser adotado ou então obtido por meio de cálculos. Neste exemplo, adota-se um valor fixo igual a 5%.
- g) O aplicativo pede agora a vazão de purgas da caldeira. O valor deve ser dado em kg de purgas por kg de combustível queimado. Este valor é de difícil determinação. De preferência, deve ser feito durante os ensaios de rendimento, em que as purgas podem ser bloqueadas. Isso também se considera neste exemplo. Desse modo, a vazão de purgas é igual a zero.
- h) O próximo dado a ser inserido é a vazão de vapor de utilidades. Por exemplo, o vapor usado na atomização do óleo combustível nos queimadores a vapor, o valor também deve ser expresso em kg de vapor por kg de combustível queimado. Neste exemplo, considera-se que a vazão de vapor de utilidade é igual a zero.
- i) Neste exemplo, foi suposto que não existe combustível não queimado nas cinzas. Então, o próximo valor a ser inserido também é igual a zero.
- j) O aplicativo agora apresenta o rendimento da caldeira calculado pelo Método Indireto: 58,87% para os dados desse exemplo. As perdas detalhadas podem ser mostradas pressionando-se o botão "Detalhamento das perdas".

Verificam-se neste exemplo as seguintes perdas:

- Pelos gases na chaminé	17,19%
- Pelo costado da caldeira	5,00%
- Nas purgas de fundo e contínua	0,00%
- No vapor de utilidades	0,00%

- No calor nas cinzas	0,63%
- No combustível não queimado	0,00%
- Na umidade do combustível	18,31%

Observa-se neste exemplo que as perdas na umidade do combustível são expressivas, pois a umidade do bagaço é de 50%, um valor bastante alto.

A Figura II.2 mostra a tela do aplicativo com os resultados detalhados.

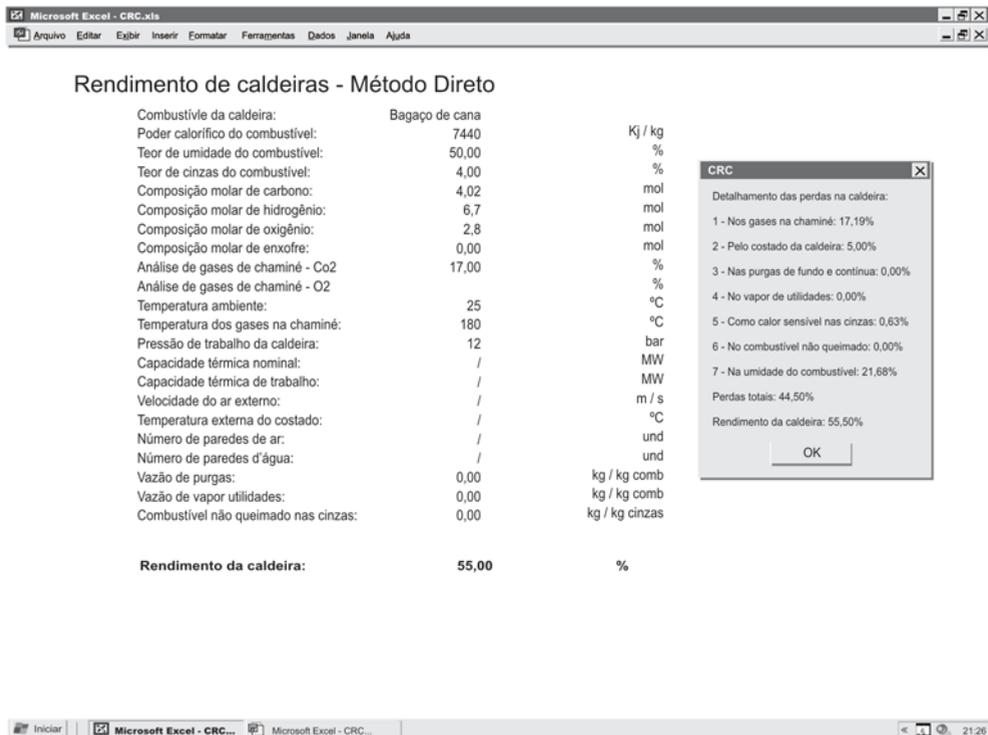


Figura II.2 - Resultados do exemplo 3, Método Indireto, usando o aplicativo CRC

1.3.4 - Cálculo da eficiência de caldeiras pelo Método Indireto

Refazer o exemplo anterior considerando uma caldeira queimando bagaço de cana com 25% de umidade e PCI igual a 8430 (kJ/kg). Os demais dados são os mesmos.

a) Escolher "Outro combustível".

b) Inserir o valor do PCI.

- c) Inserir os valores da composição (são os mesmos do exemplo anterior, pois a análise sempre deve ser dada em base seca).
- d) Inserir os dados faltantes.
- e) O rendimento calculado é de 71,20%.

Pode-se verificar que a redução da umidade do bagaço de cana de 50% para 25% produziu um aumento de rendimento da caldeira de 58,87% para 71,20%. A parcela de perda de rendimento da caldeira na umidade do combustível foi reduzida de 18,31% para 8,08%. Fica evidente a melhoria do rendimento da caldeira quando se usa um combustível com menor teor de umidade.

1.3.5 - Influência da temperatura da água de alimentação no consumo de combustível

Utilizando o Método Direto, calcular a variação do consumo de combustível em uma caldeira queimando óleo combustível 2A para a água de alimentação com temperaturas de 25°C e 95°C, para produção de 1,5 kg/h de vapor superaquecido com pressão de 22 kg e temperatura de 280°C.

- a) Vapor superaquecido: (22 kg e 280°C) e vazão de vapor: 1,5 kg/s (5.400 kg/h), com água de alimentação a 25°C e vazão de combustível de 0,13 kg/s (468 kg/h). Resulta em um rendimento de 83,13 %.
- Entalpia do vapor - Entalpia da água = 2.982,27 - 103,48 = 2.878,79 kJ/kg
 - Energia do vapor: 1,5 kg/s * 2.878,79 kJ/kg = 4318,19 kJ/s
 - Energia do combustível = PCI combustível * vazão = 0,13 kg /s * 39.960,0 kJ/kg = 5.194,5 kJ/s
 - **Rendimento** = Energia do vapor / Energia do combustível = 4318,19 / 5.194,5 = **83,13%**
- b) Vapor superaquecido (22 kg e 280°C) e geração de vapor 1,5 kg/s, com a temperatura da água de alimentação em 95°C. Agora, a vazão de combustível é determinada considerando inalterado o rendimento de 83,13 % da caldeira:
- Entalpia do vapor - Entalpia da água = 2.982,27 - 397,12 = 2585,15 kJ/kg
 - Energia do vapor: 1,5 kg/s * 2.878,79 kJ/kg = 4318,19 kJ/s
 - Energia do combustível = PCI combustível * vazão = (m_c * 39.960,0) kJ/kg
 - **Rendimento** = Energia do vapor / Energia do combustível = 3877,72 / (m_c * 39.960,0) = **83,13%**
 - m_c = 0,1167 kg/s ou 420,2 kg/h

Tabela II.3 - Aplicação do Método Direto para água de alimentação a 25,0°C

RENDIMENTO DE CALDEIRAS MÉTODO DIRETO		
Tipo de vapor	Vapor superaquecido	
Pressão do vapor	22,0	(bar)
Temperatura do vapor	280,0	(°C)
Entalpia do vapor	2982,27	(kJ/kg)
Vazão de vapor	1,50	(kg/s)
Temperatura da água de alimentação	25,0	(°C)
Entalpia da água de alimentação	103,48	(kJ/kg)
Tipo de combustível	Óleo combustível 2A	
Poder calorífico do combustível	39960	(kJ/kg)
Vazão de combustível	0,13	(kg/s)
Rendimento da caldeira	83,13	(%)

Tabela II.4 - Aplicação do Método Direto para água de alimentação a 95,0°C

RENDIMENTO DE CALDEIRAS MÉTODO DIRETO		
Tipo de vapor	Vapor superaquecido	
Pressão do vapor	22,0	(bar)
Temperatura do vapor	280,0	(°C)
Entalpia do vapor	2982,27	(kJ/kg)
Vazão de vapor	1,50	(kg/s)
Temperatura da água de alimentação	95,0	(°C)
Entalpia da água de alimentação	397,12	(kJ/kg)
Tipo de combustível	Óleo combustível 2A	
Poder calorífico do combustível	39960	(kJ/kg)
Vazão de combustível	0,1167	(kg/s)
Rendimento da caldeira	83,13	(%)

Segundo este exemplo, pode-se verificar que o pré-aquecimento da água de alimentação utilizando os gases quentes de escape da caldeira resulta em uma economia de combustível.

$$\text{Economia} = (0,1300 - 0,1167) / 0,1300 \text{ ou } (468,0 - 420,2) / 420,2 = \mathbf{10,2\%},$$

Considerando que a caldeira opere 24 h/dia e 7 dias/semana e 50 semanas/ano (8400 h), a economia em um ano será: 8400 h/ano x (468,0 - 420,2) kg/h = 401.520 kg/ano. Com o preço do óleo combustível de R\$1,07 / kg, a redução do custo com consumo de combustível = **R\$ 429.626,40 / ano.**

1.4 - Sugestões para identificar oportunidades na geração

- a)** Avalie a eficiência da caldeira (%).
 - Determine a temperatura dos gases de escape após a caldeira ser ajustada às especificações do fabricante. A caldeira deve operar com níveis de excesso de ar próximo ao ótimo e com todas as superfícies de transferência de calor limpas.
 - Determine a temperatura mínima a que os gases da pilha podem ser resfriados, submetidos a critérios tais como o ponto de orvalho, corrosão da extremidade fria e superfície econômica de transferência de calor.
- b)** Verifique pontos quentes no costado (estrutura externa).
- c)** Determine a taxa de descarga de fundo da caldeira (% do fluxo da água de alimentação, kg/h).
- d)** Investigue as oportunidades de melhoria na qualidade da água de alimentação da caldeira.
- e)** Avalie as oportunidades de recuperação de calor da descarga de fundo da caldeira.
- f)** Monitore o teor de oxigênio nos gases da chaminé (%).
- g)** Monitore a temperatura dos gases de exaustão na chaminé com respeito à demanda de vapor da caldeira, temperatura ambiente e teor de oxigênio nos gases de exaustão.
- h)** Monitore os gases combustíveis na chaminé (ppm).
 - Estude o custo efetivo da instalação de um economizador para aquecer a água de alimentação ou um pré-aquecedor para aquecer o ar de combustão em sua caldeira.
- i)** Avalie a perda de carbono não queimados (%).
- j)** Compare os valores observados com os de referência ou ótimos (benchmark).

2

IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

A eficiência na distribuição de vapor é determinada pela capacidade de conduzi-lo desde a caldeira até os pontos de uso com a menor perda de energia possível. 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. Porém, há muitas perdas na distribuição que se não forem identificadas e corrigidas podem comprometer todo o sistema de vapor.

2.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência na distribuição de vapor

- **Perdas durante o período de pré-aquecimento.** Sempre que o sistema de vapor permanece desligado acima de um determinado tempo, há um resfriamento de toda a massa metálica que constitui as tubulações, conexões e acessórios do sistema de distribuição. No re-ligamento do sistema de vapor há um grande consumo de calor para pré-aquecer o sistema.
- **Perda em operação contínua.** Há também as perdas de calor através das tubulações e isolamentos durante a operação do sistema, que podem ser minimizadas com a instalação de isolamento com espessura adequada e revestimentos removíveis para válvulas e conexões móveis.

2.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência na distribuição

As perdas em um sistema de distribuição de vapor podem ser divididas em categorias, de acordo com as áreas:

- vazamento de vapor;
- radiação de perda de calor através da isolação térmica;
- recuperação do condensado;
- perda de vapor flash (vapor de re-evaporação); e
- reduzindo os ciclo de partida e parada.

2.2.1 - Vazamento de vapor

A redução dos vazamentos de vapor constitui uma área de grande potencial de economia para as instalações industriais. Dois tipos principais de falhas que resultam em vazamento de vapor são: (a) falha na tubulação; e (b) falha nos purgadores de vapor. Geralmente, as falhas nos purgadores constituem uma grande parcela de perdas dentro de uma instalação. As perdas de vapor nas tubulações também podem ser uma das maiores fontes de perdas nas instalações. Entretanto, esta geralmente é identificada por uma avaliação visual e eliminada com facilidade. As falhas nos purgadores de vapor são mais difíceis de serem observadas, especialmente em sistema de condensado fechado.

a) Reparo de falhas na tubulação de vapor

Os componentes de uma tubulação de vapor falham devido a projeto inadequado, corrosão, fatores externos e muitas outras razões. As falhas nas tubulações representam a perda direta de recursos e de combustível (Tabela II.5).

Tabela II.5 - Perdas causadas por vazamentos

VAZAMENTO		PRESSÃO DE 7 KGF/cm ² (PERDAS ANUAIS)	PERDAS DE ÓLEO COMBUSTÍVEL
Diâmetro (mm)	Superfície (mm ²)	Toneladas de vapor	kg/ano
0,8	0,5	5,0	380,0
1,5	1,8	95,0	7.300,0
3,0	7,0	160,0	12.300,0
6,0	28,0	2.900,0	223.000,0

b) Reparo de falhas nos purgadores de vapor

Em sistemas de vapor nos quais não são se realizam manutenção há 3 ou 5 anos, entre 15% a 30% dos purgadores instalados podem apresentar defeitos, como o escape de vapor vivo para a linha de retorno de condensado. Em sistemas cujos programas de manutenção são regularmente executados os níveis de perdas em purgadores são menores que 5% para o conjunto de purgadores. Se o sistema de distribuição de vapor incluir mais de 500 purgadores, um exame nos purgadores provavelmente revelará perdas significativas de vapor (Tabela II.6).

Tabela II.6 - Taxa de perda de vapor por vazamento em purgador

DIÂMETRO DO ORIFÍCIO DO PURGADOR	PERDA DE VAPOR (kg/h)			
	PRESSÃO DO VAPOR (kgf/cm ²)			
(mm)	1	6,8	10	20
0,8	0,4	1,5	2,2	-
1,6	1,5	6,0	8,6	16,4
3,2	6,2	24,0	34,4	65,8
4,8	13,9	54,0	77,1	147,9
6,4	24,8	95,7	137,4	262,6
9,5	55,8	215,5	309,4	591,0

- **Testes de purgadores de vapor.** Os purgadores de vapor devem ser testados para determinar se estão funcionando adequadamente, se não obstruindo a passagem de condensado ou se não estão falhando na posição aberta, permitindo a fuga de vapor vivo para a linha de retorno de condensado. Há quatro métodos básicos para testar os purgadores de vapor: temperatura, sonoro, visual e eletrônico.

Em seguida, deve-se estabelecer um programa de inspeção, testes e manutenção sistemática dos purgadores vapor, incluindo um mecanismo indicador para assegurar a eficácia e fornecer meios de documentar as economias de energia e de dinheiro.

Intervalos recomendados de teste para purgadores de vapor

- Alta pressão (10 kgf/cm² e acima): semanal a mensal
- Media pressão (2 a 10 kgf/cm²): mensal a quadrimestral
- Baixa pressão (Abaixo de 2 kgf/cm²): anual

2.2.2 - Redução de perda de calor através da isolamento térmica

O isolamento térmico reduz a perda de calor da tubulação para o ambiente. Quanto maior a sua espessura, menor será a perda, porém maior será o custo de instalação.

- **Exemplo de determinação de perdas de calor em uma linha de vapor.** Um sistema de distribuição de vapor consistindo de 100 m de aço carbono com diâmetro Φ 100 mm, o qual inclui nove pares de uniões flangeadas PN40 e uma válvula de isolamento. Com temperatura ambiente de partida de 20°C e o vapor com 14,0 bar de pressão e 198°C de temperatura e ar ambiente praticamente parado, determinar:

- a) massa de vapor condensado para um pré-aquecimento de 30 minutos.
- b) taxa de condensação na operação para uma espessura de isolamento térmico de 50 mm.

Parte 1 - Cálculo da taxa de condensação no pré-aquecimento

Esta taxa de condensação no pré-aquecimento será usada para selecionar a válvula de controle apropriada para o pré-aquecimento. Quando selecionar os purgadores, esta taxa de condensação deverá ser multiplicada por um fator de 2 para permitir a redução da pressão de vapor, que ocorrerá até que o pré-aquecimento esteja completo. Então, dividida pelo número de purgadores utilizados para dar a capacidade necessária para cada purgador. Usando a equação:

$$\dot{m} = \frac{60 \cdot W \cdot (T_v - T_{amb}) \cdot c_p}{h_{fg} \cdot t} \quad \text{kg/h}$$

em que:

- \dot{m} - Vazão de vapor condensado (kg/h);
- W - Massa (peso) da tubulação e acessórios (kg);
- T_v - Temperatura do vapor (°C);
- T_{amb} - Temperatura ambiente (°C);
- c_p - calor específico do material da tubulação (kJ/kg°C);
- h_{fg} - entalpia do vapor (kJ/kg);
- t - tempo de pré-aquecimento (min); e
- Calor específico c_p p/ aço carbono = 0,49 kJ/kg°C (Tabela II.7).

Tabela II.7 - Calor específico típico para metais de tubulações

MATERIAL DA TUBULAÇÃO	CALOR ESPECÍFICO A 300 °C
	(KJ/kg°C)
Cobre	0,385
Aço carbono	0,490
Aço cromo	0,443
AISI 302 Aço inox	0,480
AISI 304 Aço inox	0,477
AISI 316 Aço inox	0,468
AISI 347 Aço inox	0,480

Para encontrar W , encontre a massa dos principais itens da linha de vapor na Tabela II.8.

Tabela II.8 - Massa típica de tubos de aço, flanges e válvulas de isolamento em kg

Φ Tubo mm	Tubo Sch. 40 Kg / m	Massa dos flanges por par			Válvula
		PN40	ANSI 150	ANSI 300	Flangeada PN40
15	1,3	1,7	1,8	2	4
20	1,7	2,3	2,2	3	5
25	2,5	2,6	2,4	4	6
32	3,4	4,0	3,0	6	8
40	4,1	5,0	4,0	8	11
50	5,4	6,0	6,0	9	14
65	8,6	9,0	8,0	12	19
80	11,3	11,0	11,0	15	16
100	16,1	16,0	16,0	23	44
150	28,2	28,0	26,0	32	88

Tubos principais de aço (Φ 100 mm) = 16,1 kg/m

Flanges PN40 (Φ 100 mm) = 16,0 kg por par

Válvula de isolamento (Φ 100 mm) = 44,0 kg cada

Assim: $W = (100 \times 16,1) + (9 \times 16) + (1 \times 44) = 1.798 \text{ kg}$

Para determinar a entalpia de vaporização h_{fg} para o vapor com a pressão de 14,0 bar (198°C), verificar em tabelas de vapor saturado.

Tabela II.9 - Propriedades de vapor 14,0 bar (198°C)

Pressão	Temperatura	Entalpia (energia) em kJ / kg			Volume específico de vapor saturado seco
	Saturação	Água	Vaporização	Vapor	
bar	°C	h_f	h_{fg}	h_g	m ³ / kg
14	198	845	1.947	2.792	0.132

Obs.: As tabelas completas encontram-se no CD

Da Tabela II.9, obtém-se: $h_{fg} = 1.947 \text{ kJ / kg}$

A carga de pré-aquecimento média será:

$$\dot{m} = \frac{60 \cdot 1789 \cdot (198 - 20) \cdot 0,49}{1947 \cdot 30} = 161 \text{ kg / h}$$

Parte 2 - Cálculo da carga de operação

O vapor irá condensar com a perda de calor da tubulação para o ambiente. A taxa de condensação depende dos seguintes fatores: temperatura do vapor, temperatura do ambiente e eficiência do isolamento.

A Tabela II.10 fornece taxas típicas de emissão de calor estimada para tubulações de aço sem isolamento a 20°C.

Tabela II.10 - Emissão de calor de uma tubulação de aço livremente exposta ao ar 20°C (W/m)

DIFERENÇA DE TEMPERATURA VAPOR P/ AR	DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO (mm)									
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
50	56	68	82	100	113	136	168	191	241	332
60	69	85	102	125	140	170	208	238	298	412
70	84	102	124	152	170	206	252	289	360	500
80	100	122	148	180	202	245	299	343	428	594
100	135	164	199	243	272	330	403	464	577	804
120	173	210	256	313	351	426	522	600	746	1042
140	216	262	319	391	439	533	653	751	936	1308
160	263	319	389	476	535	651	799	918	1145	1603
180	313	381	464	569	640	780	958	1100	1374	1925
200	368	448	546	670	754	919	1131	1297	1623	2276
220	427	520	634	778	877	1069	1318	1510	1892	2655

A linha principal de distribuição, normalmente, é isolada, e se os flanges e outros itens da linha de vapor também forem isolados será uma vantagem.

Se a linha principal é flangeada, cada par de flanges terá, aproximadamente, a mesma área superficial de uma linha de tubos de 300 mm de comprimento e mesmo diâmetro.

A taxa de transferência de calor aumenta quando a superfície de transferência está submetida ao ar em movimento. Nestes casos, o fator de multiplicação, mostrado na Tabela II.11, deverá ser considerado.

Tabela II.11 - Aumento na emissão devido ao movimento do ar sobre a tubulação

VELOCIDADE DO AR (m/s)	FATOR DE EMISSÃO (-)
0,00	1,0
0,50	1,0
1,00	1,3
1,5	1,5
2,00	1,7
2,50	1,8
3,00	2,0
4,00	2,3
6,00	2,9
8,00	3,5
10,00	4,0

Em termos diários, a velocidade do ar de até 4 ou 5 m/s representa uma leve brisa; entre 5 e 10 m/s, uma brisa mais forte. A velocidade típica do ar de trabalho está em torno de 3 m/s.

A redução na perda de calor depende do tipo e da espessura do material de isolamento usado, em condições gerais. Para propósitos práticos, o isolamento da linha de vapor reduzirá a emissão de calor por um fator de isolamento mostrado na Tabela II.12. Note que estes fatores são somente valores nominais. Para um cálculo específico, consultar o fabricante do isolamento térmico.

A perda de calor pelo isolamento principal pode ser expressa como na equação:

$$\dot{m}_v = \frac{3,6 \cdot \dot{Q} \cdot L \cdot f}{h_{fg}} \text{ kg/h}$$

em que:

\dot{m}_v - Taxa de condensação (kg/h);

\dot{Q} - Taxa de emissão de calor da tabela II.10 (W/m);

L - Comprimento efetivo total da tubulação (m);

h_{fg} - Entalpia específica de vaporização na pressão de operação (kJ/kg); e

f - Fator de Isolamento (Tabela II.12).

Nota: f = 1,0 para tubulação não isolada.

(O fator 3,6 na equação acima fornece uma solução em kg/h.)

Tabela II.12 - Fator Isolamento (f)

Φ TUBO NB (mm)	PRESSÃO DO VAPOR			
	1 bar	5 bar	15 bar	20 bar
Espessura de isolamento = 50 mm				
15	0,16	0,14	0,13	0,12
20	0,15	0,13	0,12	0,11
25	0,14	0,12	0,11	0,10
32	0,13	0,11	0,10	0,10
40	0,12	0,11	0,10	0,09
50	0,12	0,10	0,09	0,08
65	0,11	0,10	0,09	0,08
80	0,10	0,10	0,08	0,07
100	0,10	0,09	0,08	0,07
150	0,10	0,09	0,07	0,07
Espessura de isolamento = 75 mm				
15	0,14	0,13	0,12	0,11
20	0,13	0,11	0,11	0,10
25	0,13	0,11	0,10	0,09
32	0,11	0,10	0,09	0,08
40	0,10	0,09	0,09	0,08
50	0,10	0,09	0,08	0,07
65	0,10	0,08	0,08	0,07
80	0,09	0,08	0,07	0,07
100	0,08	0,08	0,07	0,06
150	0,08	0,07	0,07	0,06
Espessura de isolamento = 100 mm				
15	0,12	0,11	0,10	0,08
20	0,11	0,10	0,09	0,07
25	0,10	0,09	0,08	0,07
32	0,10	0,08	0,08	0,06
40	0,09	0,08	0,08	0,06
50	0,08	0,08	0,07	0,06
65	0,08	0,07	0,06	0,05
80	0,07	0,07	0,06	0,05
100	0,07	0,07	0,06	0,05
150	0,07	0,06	0,05	0,04

- **Determinação do comprimento, L**

Assumindo um comprimento equivalente a 0,3 m para cada par de flanges e 1,2 m para válvula de isolamento, o comprimento efetivo total (L) da linha de vapor neste exemplo:

$$L = 100 + (9 \cdot 0,3) + (1 \cdot 1,2) = 103 \text{ m}$$

- **Determinação da taxa de emissão de calor, \dot{Q}**

A temperatura do vapor a 14,0 bar é de 198°C. Com a temperatura ambiente de 20°C, a diferença de temperatura é 178°C.

Da Tabela II.10, a perda de calor para uma tubulação de 100 mm = 1.374 W/m

- **Determinação do fator isolamento f,**

O fator isolamento para espessura de isolamento de 50 mm em uma tubulação de F 100 mm a 14 bar g é aproximadamente 0,08 (Tabela II.12).

Da Tabela II.9 - $h_{fg} = 1.947 \text{ kJ / kg}$

$$\dot{m}_v = \frac{3,6 \cdot 1374 \cdot 103 \cdot 0,08}{1947} = 20,9 \text{ kg/h}$$

Como pode ser visto neste exemplo, a carga de pré-aquecimento de 161 kg/h é substancialmente maior que a carga de operação de 20,9 kg/h. Em geral, purgadores de vapor dimensionados pelo ciclo de trabalho de pré-aquecimento automaticamente atendendo à carga de operação.

Se a linha de vapor acima não for isolada ou o isolamento estiver danificado, a carga de operação será aproximadamente catorze vezes maior. Com uma linha não isolada ou uma linha pobremente isolada, é necessário, sempre, comparar as cargas de operação de pré-aquecimento. A carga mais elevada deve ser usada para dimensionar os purgadores de vapor, como descrito acima. O Ideal é melhorar a qualidade do isolamento térmico.

Nota: Quando calcular as perdas por pré-aquecimento, é interessante considerar a correta especificação da linha de vapor, pois a "massa" pode variar entre diferentes padrões de tubos.

Determinação da espessura de isolamento

A espessura ideal é a resultante da comparação econômica entre o custo do isolamento e o da energia perdida. 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 fatores:

- 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.

A Figura II.3 reproduz uma situação típica evidenciando que os custos das perdas de calor tendem a reduzir com o aumento da espessura do isolante, enquanto os custos do próprio isolante tendem a crescer.

Na prática, raramente a espessura dos isolamentos térmicos é determinada por cálculos. Na maioria dos casos, utilizam-se espessuras já consagradas pelo uso.

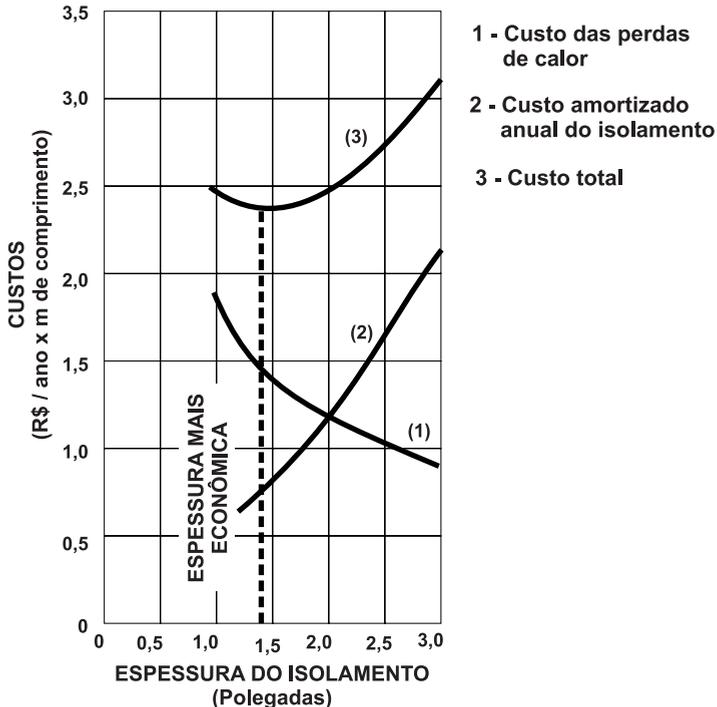


Figura II.3 - Espessura econômica de isolamento térmico

Tabela II.13 - Espessuras usuais dos isolamentos térmicos para tubulações

ESPESSURA DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS DA TUBULAÇÃO (mm)														
HIDROSSILICATO DE CÁLCIO														
DIÂMETRO	Temperatura de operação da tubulação (°C)													
NOMINAL (pol)	75	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	500	550	600
¾	25	25	38	38	51	51	63	63	63	63	63	63	63	63
1	25	25	38	38	51	51	63	63	63	63	63	63	63	63
2	25	25	38	38	51	51	63	63	63	63	63	63	76	76
3	25	25	38	38	51	51	63	63	63	63	63	76	76	89
4	25	25	38	38	51	51	63	63	63	63	76	76	89	89
6	25	25	38	38	51	51	63	63	76	76	89	102	102	114
8	25	25	38	38	51	51	63	76	76	89	102	114	114	126
10	25	38	38	51	51	63	63	76	89	102	102	114	126	126
12	25	38	38	51	63	63	76	76	89	102	114	126	126	126
14	25	38	38	51	63	63	76	89	89	102	114	126	126	126
16	25	38	51	51	63	63	76	89	102	102	114	126	126	126
20	25	38	51	51	63	63	76	89	102	114	126	126	126	126
24	25	38	51	51	63	63	76	89	102	114	126	126	126	126

Para o exemplo anterior: tubulação de 100 mm (~4 pol) e temperatura de operação 198°C (~200°C), a espessura usual será de 51 mm. Quando as perdas de calor devem ser reduzidas, as espessuras do isolamento devem ser aumentadas, pois a Tabela II.13 indica valores médios.

2.2.3 - Recuperação do condensado

Quando o vapor transfere seu calor, em um processo de manufatura, em um trocador de calor ou em uma serpentina de aquecimento, retorna à fase líquida, denominada condensado. Um método atrativo de melhorar a eficiência energética de um sistema de vapor consiste em retornar o condensado para a caldeira. O retorno do condensado quente para caldeira faz sentido por diversas razões. Quanto mais condensado retorna, menor será o custo de abastecimento e de tratamento da água, menor o consumo de combustível, de água e de produtos químicos e quanto menos condensado for descarregado no sistema de esgoto, menor será o custo de sua eliminação. O retorno do condensado de elevada pureza reduz também as perdas de energia, devido à descarga de fundo da caldeira. Economias significativas do combustível ocorrem porque o condensado retornado está relativamente quente (55°C a 100°C), reduzindo a quantidade da água fria de alimentação (20°C a 30°C) que deve ser aquecida.

Quando 1 kg de vapor condensa completamente, 1 kg de condensado é formado na mesma pressão e temperatura. Um sistema de vapor eficiente reutilizará este condensado. O vapor saturado usado para aquecimento fornece calor latente (entalpia de evaporação), que é uma grande parte do calor total contido no vapor. O restante de calor no vapor permanece no condensado como calor sensível (entalpia da água).

O condensado é, basicamente, água destilada, que é ideal para o uso como água de alimentação da caldeira. Um sistema de vapor eficiente coletará este condensado para retorná-lo ou a um desaerador ou como água de alimentação da caldeira, ou usá-lo em outro processo. Somente quando houver risco real de contaminação é que o condensado não deverá ser retornado à caldeira. Mesmo assim pode ser possível coletar o condensado e usá-lo como a água quente de processo ou passá-lo através de um trocador de calor, onde seu conteúdo de calor pode ser recuperado antes de descartá-lo como água no dreno.

Algumas vantagens para a recuperação e retorno do condensado:

- redução no consumo de água;
- redução de efluente e possível custo de resfriamento;
- redução no custo com consumo de combustível;
- aumento na produção de vapor na caldeira;
- redução na perda energia pela descarga de fundo; e
- redução de custo do tratamento químico da água bruta.

O custo da água tem uma ampla gama de preços, dependendo de onde se localiza a planta industrial, podendo variar de custo zero de captação da água bruta a 6,5 R\$/m³ para água tratada na área metropolitana de São Paulo, onde custo do efluente também pode atingir o custo de 6,5 R\$/m³.

Recuperação do condensado como forma de gerar economias significativas

Uma grande fábrica de papéis especiais reduziu a taxa de alimentação de água bruta de alimentação da caldeira de aproximadamente 35% da produção de vapor para 14% a 20% com o aproveitamento do condensado retornado, proporcionando uma economia anual adicional de mais de R\$900.000,00.

2.2.4 - Recuperação do vapor flash

O vapor flash é produzido pela passagem do condensado quente do sistema de alta pressão para o sistema de baixa pressão, que produz o fenômeno de re-evaporação. O vapor

produzido em uma caldeira pelo processo de adição de calor à água é freqüentemente denominado "vapor vivo". Os termos vapor vivo e vapor flash são usados somente para diferenciar sua origem. Se o vapor foi produzido em uma caldeira ou por processo natural de re-evaporação, tem exatamente o mesmo potencial para fornecer calor. O vapor flash gerado do condensado pode conter até a metade da energia total do condensado. Um sistema eficiente de vapor recupera e usa o vapor flash, pois o descarte do condensado e do vapor flash para o esgoto significa mais água bruta captada para alimentação, mais combustível e aumento de custos.

O condensado é drenado de instalações industriais e de equipamentos de vapor através de purgadores de vapor de pressão mais alta para pressão mais baixa. Em consequência desta queda na pressão, parte do condensado irá re-evaporar, produzindo vapor flash. A proporção de vapor flash gerado desta forma é determinada pela quantidade de calor que pode permanecer no vapor e no condensado. Uma quantidade típica de vapor flash é de 10% a 15%. Entretanto, uma mudança volumétrica percentual pode ser consideravelmente maior. O condensado com uma pressão de 7 bar perderá aproximadamente 13% de sua massa quando expandir à pressão atmosférica, mas o vapor produzido requererá um espaço umas 200 vezes maior do que o condensado do qual foi formado. Isto pode ter o efeito de bloquear os purgadores de linhas de descarga subdimensionadas, e deve ser levado em conta quando dimensionar estas linhas.

Em qualquer sistema que busque maximizar a eficiência, o vapor flash deve ser separado do condensado e utilizado em aplicações de baixa pressão. Cada quilograma do vapor flash usado desta forma é um quilograma de vapor que não necessita ser produzido pela caldeira. É também um quilograma do vapor não descartado para atmosfera. Isto representa uma substancial quantidade de energia útil, que é toda perdida no balanço de calor do circuito de vapor e condensado, e oferece uma oportunidade única para aumentar a eficiência do sistema se ele puder ser capturado e utilizado. As razões para a recuperação do vapor flash são justificadas por fatores econômicos e ambientais, assim como as razões para a recuperação do condensado.

Quantidade de vapor flash disponível em uma massa de condensado

Para a utilização do vapor flash, é útil conhecer a quantidade possível de ser obtida de uma massa de condensado com determinada pressão e temperatura. A quantidade é determinada rapidamente por cálculos ou pode ser lida em tabelas ou dadas em diagramas simples.

2.3 - Exemplos

2.3.1 - Cálculo do valor econômico do condensado

Uma caldeira produz 10.000 kg/h de vapor 24 horas/dia, 7 dias/semana e 50 semanas/ano (8400 horas / ano). A temperatura da água de alimentação é de 20°C. Normalmente, todo o condensado é descartado para esgoto a 90°C. O custo da água bruta é de R\$ 0,60/m³ e o custo do efluente é de R\$ 0,45/m³. A eficiência da caldeira é de 85%, e a tarifa do gás natural é de R\$699,50/103m³ ou (R\$18,00/GJ). Determinar o valor anual de retorno do condensado:

Este problema pode ser resolvido em quatro partes:

- 1 - custo do combustível consumido para aquecer a água de alimentação;
- 2 - custo da água de alimentação consumida;
- 3 - custo do efluente gerado; e
- 4 - valor total do condensado.

Parte 1 - Cálculo do custo do combustível consumido para aquecer a água de alimentação

Cada quilograma de condensado não retornado para o tanque de alimentação da caldeira deve ser repostado por 1 kg água fria (20°C), que deve ser aquecida para a temperatura do condensado (90°C), ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$). Calcular o calor necessário para elevar 1 kg de água em 70°C, usando a equação:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

em que:

- Q = quantidade de energia (kJ);
- m = massa de substância (kg);
- c_p = calor específico da substância (kJ/kg °C); e
- ΔT = elevação da temperatura da substância (°C).

A massa m é unitária; ΔT é a diferença entre a água fria e a temperatura de retorno do condensado; c_p é o calor específico da água 4,19 kJ/kg °C. Assim:

$$Q = 1 \text{ kg} \times 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \times 70^\circ\text{C} = 293,3 \text{ kJ/kg}$$

Baseando os cálculos para uma produção média de vapor de 10.000 kg/h, com a caldeira operando 8.400 h/ano, a energia necessária para repor o calor para água será:

$$Q_{\text{ano}} = 10.000 \text{ kg/h} \times 293,3 \text{ kJ/kg} \times 8.400 \text{ h/ano} = 24.637,2 \text{ GJ/ano}$$

Se a eficiência média da caldeira é de 85%, a energia fornecida para produção de vapor:

$$Q_{\text{comb}} = 24.637,2 \text{ GJ/ano} / 0,85 = 28.984,94 \text{ GJ/ano}$$

Com um custo do combustível de R\$18,00/GJ, o valor da energia no condensado:

$$\text{Custo anual do combustível} = 28.984,94 \text{ GJ/ano} \times \text{R}\$18,00/\text{GJ} = \text{R}\$ 521.728,94$$

Parte 2 - Cálculo do custo da água de alimentação consumida

A água é vendida por volume e sua densidade à temperatura ambiente é de 1.000 kg/m³. A quantidade total de água necessária em um ano para repor o condensado não retornado é:

$$\frac{8400 \cdot 10000}{1000} = 84000 \quad \text{m}^3 / \text{ano}$$

Se o custo unitário da água é de **R\$0,60 por m³**, o custo anual da água será:

$$\text{(Região 1) - Custo anual da água} = 84.000 \text{ m}^3/\text{ano} \times \text{R}\$0,60/\text{m}^3 = \text{R}\$50.400,00$$

Para o caso de estar na área metropolitana de São Paulo:

$$\text{(Região 2) - Custo da água} = 84.000 \text{ m}^3/\text{ano} \times \text{R}\$6,50/\text{m}^3 = \text{R}\$546.000,00$$

Parte 3 - Cálculo do custo do efluente gerado

O condensado que não é recuperado deve ser descartado como rejeito e será cobrada uma taxa pelo serviço de esgoto. A quantidade total de água rejeitada em um ano também será igual a 84.000 m³

Se o custo do efluente na região 1 é de **R\$ 0,35 por m³**, o custo anual do efluente:

$$\text{Custo anual do efluente} = 84.000 \text{ m}^3/\text{ano} \times \text{R}\$0,35/\text{m}^3 = \text{R}\$29.400,00$$

Se o custo do efluente na região 2 é de **R\$ 6,50 por m³**, o custo anual do efluente:

$$\text{Custo anual do efluente} = 84.000 \text{ m}^3/\text{ano} \times \text{R}\$6,50/\text{m}^3 = \text{R}\$546.000,00$$

Parte 4 - Valor total do condensado

O valor total anual de 10.000 kg/h de condensado perdido no esgoto é mostrado na Tabela II.14.

Tabela II.14 - O valor potencial do retorno de condensado

ECONOMIA	REGIÃO 1	REGIÃO 2
Combustível	R\$ 521.728,94	R\$ 521.728,94
Água	R\$50.400,00	R\$546.000,00
Efluente	R\$29.400,00	R\$546.000,00
Valor Total	R\$ 601.528,94	R\$1.613.728,00

2.3.2 - Cálculo da viabilidade do retorno do condensado

Se para efetuar o retorno do condensado for requerido um investimento de **R\$ 125.000,00** em um projeto para retornar 55% do condensado, calcular a economia e tempo de retorno simples:

Economia (região 1) = R\$ 601.528,94 x 55 / 100 = **R\$ 330.840,92 / ano**

Tempo de retorno = R\$ 125.000,00 / (R\$ 330.840,92 / ano) = 0,38 ano (**19 semanas**)

Economia (região 2) = R\$ 1.613.728,00 x 55 / 100 = **R\$ 887.550,40 / ano**

Tempo de retorno = R\$ 125.000,00 / (R\$ 887.550,40 / ano) = 0,14 ano (**7 semanas**)

Obs.1: Esses cálculos não incluem um valor para a economia, devido ao correto controle TDS (total de sólidos dissolvido) e à redução da descarga de fundo, a qual reduzirá a perda de água e os custos com produtos químicos para tratamento da água.

Obs.2: Em áreas metropolitanas, é inviável economicamente a utilização de sistemas de vapor se não houver um retorno quase integral do condensado.

2.3.3 - Cálculo da quantidade de vapor flash no condensado

Considere-se a entalpia do condensado recém-formado na pressão e temperatura do va-

por (obtida das tabelas de vapor). Por exemplo, na pressão de 7 bar o condensado irá conter 721 kJ/kg na temperatura de 170,5°C. Se este condensado é descarregado para a atmosfera, ele somente pode existir como água a 100°C, contendo 419 kJ/kg de entalpia de água saturada.

O excesso de entalpia - $721 - 419 = 302$ kJ/kg - irá evaporar proporcional quantidade de água, produzindo vapor à pressão atmosférica. O vapor de baixa pressão produzido é usualmente chamado de "vapor flash", que pode ser calculado da seguinte forma:

Produção de vapor flash

$$m_v = [\text{Excesso de entalpia kJ/kg}] / [\text{entalpia específica de evaporação a baixa pressão}]$$

$$m_v = 302,0 \text{ kJ/kg} / 2257,0 \text{ kJ/kg} = \mathbf{0,134 \text{ kg}} \text{ de vapor por kg de condensado ou } \mathbf{13,4 \%}.$$

Se o purgador descarrega 500 kg/h de condensado com pressão de 7 bar para a atmosfera, a quantidade de vapor flash gerado será de $500 \times 0,134 = 67$ kg/h, equivalente a aproximadamente 38 kW de energia perdida. Isso representa uma substancial quantidade de energia útil, que é toda perdida do balanço de calor para o circuito de vapor e condensado, e oferece uma oportunidade única para aumentar a eficiência do sistema e ele puder ser capturado e utilizado.

Exemplos de aplicação do vapor flash (Figura II.4 e II.5)

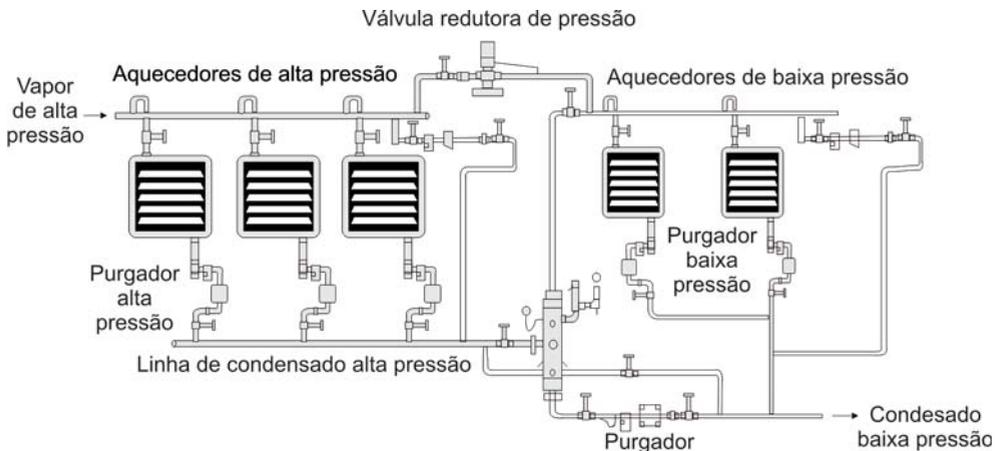


Figura II.4 - Aplicação de vapor de re-evaporação em sistema de aquecimento de ar

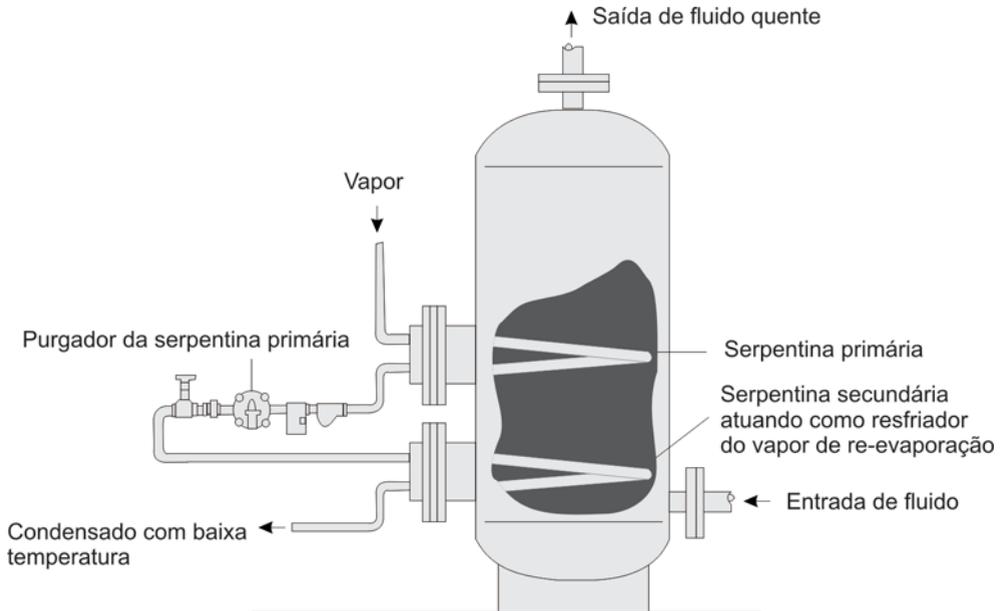


Figura II.5 - Aplicação de vapor de re-evaporação em serpentina secundária

2.4 - Sugestões para identificar oportunidades na distribuição

- a) Encontre e conserte os vazamentos de vapor.
- b) Implemente um programa de gerenciamento dos purgadores de vapor.
- c) Investigue as áreas com potencial para retorno do condensado:
 - Se não existir um sistema do retorno de condensado, estime o custo do retorno de condensado e do sistema de tratamento (quando necessário) e instale um se for economicamente justificável.
 - Conserte os vazamentos das tubulações de distribuição de vapor e do sistema de retorno do condensado.
 - Instale isolamento térmico no encanamento do sistema de retorno do condensado para conservar o calor e proteger o pessoal contra possíveis queimaduras.
- d) Avalie as condições dos isolamentos térmicos.
- e) Verifique as oportunidades de reaproveitamento do vapor flash.

3

IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES NO USO FINAL DE VAPOR

Há muitos caminhos para otimizar o uso de vapor. Tudo depende do processo e do equipamento. Em alguns casos, os equipamentos podem ser instalados para fazer o processo mais eficiente. Por exemplo, secadores multiestágios são freqüentemente mais eficientes que os secadores de único estágio. Entretanto, em geral, a otimização da eficiência de utilização do vapor nos pontos de uso final requer uma avaliação caso a caso.

3.1 - Identificação dos fatores que afetam a eficiência no uso final

A função típica do vapor em uma grande gama de aplicações consiste em 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.

Os projetos de equipamentos que utilizam vapor devem ser efetuados de forma a obter uma baixa perda térmica para o ambiente, possibilitando assim uma alta eficiência na aplicação de vapor.

A eficiência energética na utilização do vapor é mantida com a limpeza das superfícies de condensação, a adequada drenagem do condensado e a permanente retirada do ar. Este último aspecto é relevante, porque o vapor sempre arrasta alguma quantidade de 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.

3.2 - Áreas de oportunidade de melhoria de eficiência no uso final

• Perda por transferência deficiente de calor do vapor para o produto

- **Perda pelo não aproveitamento total da energia do vapor** - A utilização somente do calor latente, descartando o calor sensível contido no condensado, pela restrição à utilização de aquecimento por vapor direto.
- **Perda de calor no condensado por deficiência na transferência de calor em superfícies de troca térmica** - Na utilização de aquecimento pelo uso de vapor indireto.

• Perdas de calor para o ambiente em superfícies aquecidas

- **Perdas por convecção** - As perdas de calor por convecção em superfícies são fortemente influenciadas pela velocidade do vento e pelo teor de umidade do ar ambiente. Um vento com velocidade de 5 km/h mais que dobra a taxa de perda de calor em uma superfície aquecida, com relação ao ar parado.
- **Perdas por radiação** - São a segunda fonte de perdas em superfícies aquecidas. Uma perda por radiação de 782 kcal/h.m², para temperatura do líquido de 45°C, passa para 2520 kcal/h.m², quando a temperatura do líquido aumenta para 90°C.

3.2.1 - Utilização de vapor direto

A injeção de vapor diretamente no líquido de processo permite que toda a capacidade de aquecimento do vapor seja utilizada, tanto o vapor latente quanto o sensível, produzindo 100% de eficiência na transferência do calor. O aquecimento com injeção direta de vapor é um processo de transferência de calor, com eficiência de 100% e controle preciso e instantâneo de temperatura, quando o vapor é misturado diretamente com o líquido ou pasta em condições altamente turbulentas. As principais aplicações dos sistemas de injeção direta de vapor estão em muitos tipos de indústrias: químicas, papel e celulose, farmacêutica, alimentícia, etc, em processos de aquecimento de líquidos que admitam o vapor condensado.

3.2.2 - Redução de perda de calor em equipamento de uso de vapor indireto

Os métodos indiretos de transferência de calor (trocadores de calor) utilizam somente o calor latente do vapor e apresentam de 15 a 20% menos eficiência do que o sistema de aquecimento direto na transferência da energia do vapor para o líquido.

Trocador de calor casco e tubo - Um trocador de calor é um equipamento onde ocorre troca térmica entre dois fluidos, normalmente separados por uma parede. Há diversos tipos construtivos, e um dos mais usados industrialmente é o de feixe tubular, constituído por um conjunto de tubos envolto por um casco. Um dos fluidos circula no interior dos tubos e o outro fluido escoar no lado externo.

A determinação da eficiência de troca térmica do vapor em trocadores de calor

$$\text{Eficiência: } \eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia fornecida}}$$

em que:

Energia útil - energia absorvida no trocador pelo produto / líquido ($E_{saída} - E_{entrada}$); e
 Energia fornecida - energia fornecida pelo vapor no trocador ($E_{saída} - E_{entrada}$).

• Perdas de calor em um tanque ou tacho de fluido de processo

A quantidade de calor necessária para a operação de um tanque ou tacho de fluido de processo é dada pela soma de diversos componentes:

- a) O calor necessário para elevar a temperatura do fluido de processo até a temperatura de operação (calor útil).
- b) O calor para elevar a temperatura do material do equipamento até a temperatura de operação.
- c) O calor perdido nas superfícies sólidas do equipamento para a atmosfera.
- d) O calor perdido na superfície do líquido exposta a atmosfera.
- e) O calor absorvido por qualquer artigo frio imerso no fluido de processo.

Contudo, em muitas aplicações somente alguns dos componentes serão significativos. Por exemplo, no caso de um tanque de armazenagem de óleo totalmente fechado e bem isolado, o calor total necessário pode ser quase inteiramente o calor necessário para elevar a temperatura do fluido.

Os itens a e b referente à energia necessária para elevar a temperatura do líquido e do material do equipamento, o item c, referente ao calor absorvido por qualquer insumo frio imerso no líquido de processo, podem ser encontrados a partir da conhecida expressão da energia associada ao aquecimento de uma quantidade de massa. Geralmente, os dados podem ser precisamente definidos, e então os cálculos do calor necessário são diretos e precisos.

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{t}$$

em que:

- \dot{Q} - calor perdido (kJ/h);
- m - massa do material (kg);
- c_p - calor específico do líquido (kJ/kg.°C);
- ΔT - diferença de temperatura (°C);e
- t - tempo de exposição (min).

Os itens c e d, referentes, respectivamente, ao calor perdido na superfície do equipamento e ao calor do líquido podem ser determinados usando a equação abaixo. Entretanto, os cálculos da perda de calor são muito mais complexos. Usualmente, dados empíricos ou tabelas baseadas em diversas suposições têm que ser levadas em conta. Segue que os cálculos da perda de calor são mais menos exatos.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

em que:

- \dot{Q} - calor perdido (kJ/h);
- U - coeficiente global de convecção (W/m²);
- A - área da superfície de troca de calor (m²); e
- ΔT - diferença de temperatura (°C).

Perda de calor na superfície sólida do equipamento (tanque, tacho, etc) para a atmosfera. O calor somente será transferido quando houver uma diferença de temperatura entre a superfície e o ar ambiente.

A Figura II.6 fornece alguns valores típicos para o coeficiente global de transferência de calor e para a transferência de calor de uma superfície plana de aço para o ar ambiente. Se o fundo do taque não estiver exposto ao ar ambiente, mas estiver posicionado no chão, é usual considerar este componente de perda de calor insignificante e pode ser seguramente ignorado.

- Para uma espessura de isolamento térmico de 25 mm, o valor de U deve ser multiplicado por um fator de 0,2.
- Para uma espessura de isolamento térmico de 50 mm, o valor de U deve ser multiplicado por um fator de 0,1.

Os valores de coeficiente global de transferência de calor mostrados na Figura II.6 são somente para condição de ar parado.

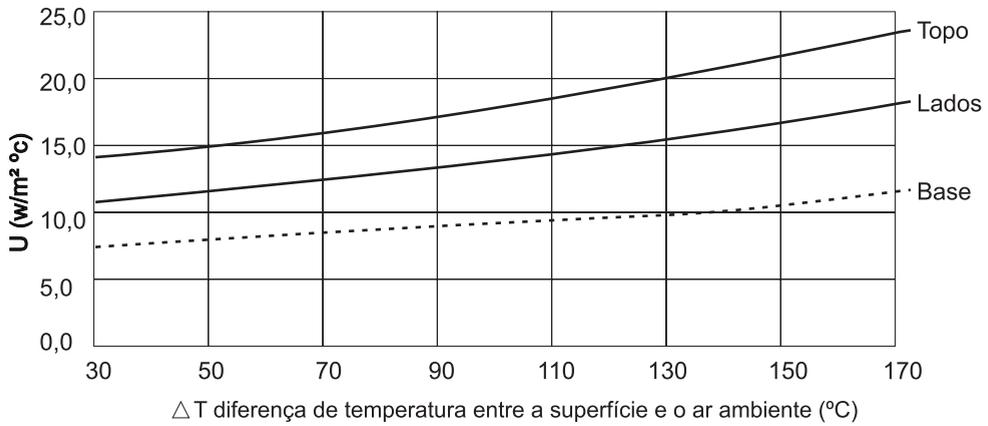


Figura II.6 - Coeficiente global de transferência calor de uma superfície plana de aço

3.2.3 - Recobrimento de recipientes abertos e aquecidos

Um recipiente aberto que contém líquido aquecido normalmente tem elevada perda de calor, devido à evaporação na superfície. Ambas as perdas, de energia e de líquido, são reduzidas pelo recobrimento do recipiente com tampas isoladas. A Tabela II.15 fornece estimativas do calor perdido por evaporação por pés quadrado de área descoberta para várias temperaturas do ar ambiente, assumindo que o ar ambiente esteja seco e que não exista corrente de ar. Um ventilador soprando ar sobre um tanque descoberto pode mais que dobrar a perda de calor.

Tabela II.15 - Perdas de calor pela evaporação de água em um tanque aberto
kcal/h.m²

TEMPERATURA DO LÍQUIDO °C	TEMPERATURA DO AR AMBIENTE °C				
	20	25	30	35	40
45	2120	1929	1738	1538	1321
55	4162	3928	3693	3450	3206
65	7725	7438	7143	6847	6552
75	13973	13608	13243	12878	12513
85	25200	24722	24244	23784	23323

3.3 - Exemplos

3.3.1 - Cálculo de rendimento em trocador de calor

A seguir, apresenta-se um exemplo ilustrativo do cálculo da eficiência do uso do vapor em um trocador de calor utilizado para aquecimento em uma indústria de suco de frutas. A temperatura de processamento é 90,6°C e temperatura de referência é de 29,4°C.

Tabela II.16 - Processo de tratamento térmico de suco de frutas

ENTRADA				SAÍDA			
Fluxo	Temperat.	Massa	Energia	Fluxo	Temperat.	Massa	Energia
	°C	kg	kcal		°C	kg	kcal
Suco	29,4	13,6	0,0	Suco	90,6	13,6	824,0
Vapor	121,1	1,8	1008,0	Cond.	82,2	1,8	105,8
				Perdas			85,7

Cálculo do Rendimento

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia fornecida}}$$

1) Sem reaproveitamento do condensado

$$\eta_1 = \frac{824,04 - 0,00}{1008,00} = 0,8175$$

$$\eta_1 = 81,75 \%$$

* Correspondendo a uma perda de 18,25%

2) Com reaproveitamento do condensado

$$\eta_2 = \frac{824,04 - 0,00}{1008,00 - 105,84} = 0,9134$$

$$\eta_2 = 91,34\%$$

* Correspondendo a uma perda de 8,66%

A Figura II.7 mostra o balanço de massa e calor no trocador

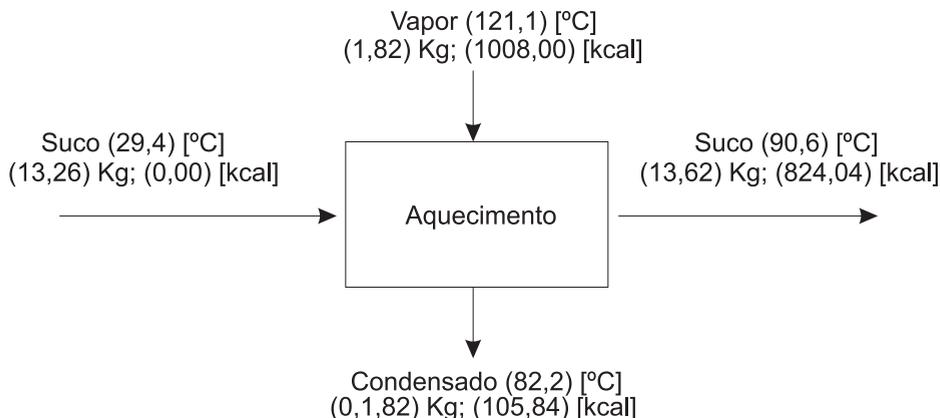


Figura II.7 - Balanço de massa e calor no trocador de calor

3.3.2 - Cálculo de rendimento em um pasteurizador

O processo de pasteurização consiste em aquecer o leite, elevando sua temperatura deste a armazenagem (10°C) até a de tratamento (72,8°C), seguindo-se o resfriamento do leite até atingir a temperatura do ambiente. O exemplo a seguir mostra o cálculo do rendimento em trocadores de calor utilizados para aquecer e resfriar leite em processos de pasteurização.

Tabela II.17 - Processo de tratamento térmico de pasteurização de leite

ENTRADA				SAÍDA			
Fluxo	Temperat.	Massa	Energia	Fluxo	Temperat.	Massa	Energia
	°C	kg	kcal		°C	kg	kcal
Leite	10,0	1,00	- 13,87	Leite	37,8	1,00	13,87
Nata	10,0	0,03	- 0,42	Nata	37,8	0,03	0,42
Vapor	121,1	0,07	40,52	Cond.	82,2	0,07	4,05
				Perdas			7,91

Cálculo do rendimento

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia fornecida}}$$

1) Sem reaproveitamento do condensado

$$\eta_1 = \frac{13,87 - (-13,87) + 0,42 - (-0,42)}{40,52} = 0,705$$

$$\eta_1 = 70,5\%$$

* Correspondendo a uma perda de 29,5%

2) Com reaproveitamento do condensado

$$\eta_2 = \frac{13,87 - (-13,87) + 0,42 - (-0,42)}{40,52 - 4,05} = 0,783$$

$$\eta_2 = 78,3\%$$

* Correspondendo a uma perda de 21,7%

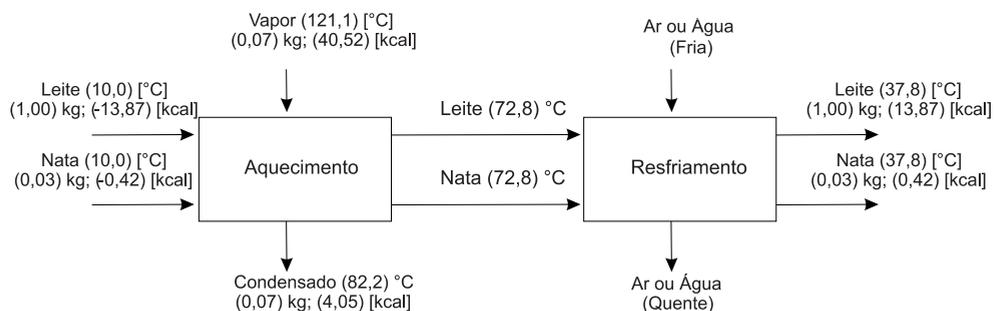


Figura II.8 - Fluxo de massa e calor no pasteurizador

3.4 - Sugestões para identificação de oportunidades

- a) Faça um levantamento do número dos equipamentos (reservatórios, tanques, tacho, reatores, etc.) abertos que contêm líquido aquecido. Para cada recipiente, determine o tempo de operação, a temperatura do líquido, a temperatura ambiente e a área exposta.

- b) Estime a perda de calor anual dos tanques descobertos e determine as reduções potenciais de consumo de combustível e de custo anual.
- c) Analise se a evaporação e as perdas de calor podem ser reduzidas abaixando a temperatura do líquido, reduzindo a sua área de exposição, minimizando o fluxo de ar sobre o tanque ou instalando uma tampa isolada.
- d) Obtenha cotações de preço de isolamento térmico para recobrimento de tampas. Instale as tampas isoladas quando são justificadas economicamente.

Sugestões para melhoria da eficiência energética em sistema de vapor

- a) Inspeccionar e consertar os purgadores de vapor.
- b) Isolar termicamente as linhas de distribuição de vapor e de retorno de condensado.
- c) Usar economizador para recuperação de calor residual.
- d) Melhorar a eficiência de combustão das caldeiras.
- e) Limpar superfícies de transferência da caldeira.
- f) Retornar o condensado para a caldeira.
- g) Minimizar as descargas de fundo da caldeira (purgas, blowdown).
- h) Recuperar o calor perdido nas descargas de fundo (purgas, blowdown).
- i) Usar o vapor de recompressão para recuperar o vapor residual de baixa-pressão.
- j) Usar a reevaporação do condensado de alta-pressão para regenerar o vapor de baixa-pressão.
- k) Usar um condensador de descarga para recuperar a energia do vapor flash.
- l) Usar o vapor residual de baixa pressão em chillers (refrigeradores) de absorção.
- m) Realizar uma análise de benchmark do custo de geração de vapor.
- n) Minimizar as perdas na caldeira decorrentes dos ciclos de operações curtos.
- o) Instalar isolamento removíveis para válvulas e conexões.
- p) Instalar desaeradores nos sistemas de vapor industrial.
- q) Revestir os recipientes abertos que são aquecidos.
- r) Substituir as válvulas redutoras de pressão por turbogeradores de contrapressão.
- s) Considerar a utilização de turbina a vapor para acionar equipamentos rotativos.
- t) Considerar a instalação de caldeiras de alta pressão com turbinas de contrapressão e gerador

- u) Instalar um sistema de controle automático das descargas de fundo (purga, blowdown).
- v) Aperfeiçoar a caldeira, com a instalação de queimadores energeticamente eficientes.
- w) Considerar a instalação de turbilhonadores em caldeiras flamotubulares de dois e três passes.
- x) Avaliar a possibilidade de utilização de combustíveis alternativos.
- y) Analisar o efeito da mudança da atual pressão de operação da caldeira

4

ASPECTOS ECONÔMICOS

4.1 - Benchmarking para o custo de vapor

Benchmarking é a prática de determinar parâmetros chaves de operação de um sistema para fornecer pontos de comparação, constituindo-se em uma valiosa ferramenta de rastreamento do desempenho do sistema, identificação de problemas e determinação da eficácia de alterações implementadas no sistema. Alguns índices de referência práticos são: eficiência da caldeira, custo unitário do vapor e necessidade de energia do produto final.

Os índices de referência podem ser usados para comparar uma instalação com um sistema teórico para determinar o desempenho máximo atingível (eficiência clássica). Os índices de referência também são usados para comparar a operação atual com o histórico das operações passadas. Isto pode identificar as falhas potenciais no sistema, bem como identificar oportunidades de melhorias da eficiência. Outro uso comum dos índices de referência é na comparação de instalações similares.

Uma aplicação direta de um índice de referência é o custo unitário de produção do vapor. Algumas instalações são equipadas com medidores de vazão de vapor, que podem ser usados conjuntamente com o custo total de combustível para determinar o custo do vapor. Um exemplo disso é o gerador de vapor que produz 1.088.640 kg de vapor em um período 24 horas, período em que 105.175 kg de óleo combustível nº 2 são consumidos. O seguinte cálculo demonstra o método usado para determinar o custo unitário do vapor, índice de referência para a instalação. O custo de combustível é de 0,70 R\$/kg, e os fatores da conversão devem ser introduzidos nos cálculos para manter unidades apropriadas.

Custo unitário do vapor = Custo total com combustíveis / quantidade de vapor produzido

Custo unitário do vapor = $(105.175 \times 0,7) / 1.088.640 = 0,07 \text{ R\$/kg de vapor} = 67,6 \text{ R\$/t}$

4.2 - Índices de referência de custo de geração de vapor nos EUA

O Índice de referência do custo de geração de vapor (R\$/1000 kg vapor) é um modo efetivo de avaliar a eficiência do sistema de vapor. Este custo é dependente do tipo de combustível, do preço do combustível, da eficiência da caldeira, da temperatura da água de alimentação da caldeira e da pressão do vapor. Estes cálculos fornecem boa aproximação para o custo de geração de vapor e servem como indicador a ser seguido para monitorar o desempenho da caldeira.

A Tabela II.18 mostra o calor de entrada necessário para produzir 1 kg de vapor a diferentes pressões e temperaturas de entrada da água de alimentação. A Tabela II.19 lista as quantidades típicas de energia e eficiência de combustão para os combustíveis mais comuns. Os dados destas tabelas podem ser usados para determinar o custo do calor útil da caldeira ou outra unidade de combustão. Os cálculos também podem incluir os custos operacionais de acessórios, tais como: bomba de alimentação de água, ventiladores/exaustores, aquecedores de combustível, vapor para atomizadores de combustível, sopradores de fuligens, tratamentos químicos e custo de manutenção e meio ambiente.

Tabela II.18 - Energia necessária para produzir vapor saturado (kcal/kg)*

PRESSÃO DE OPERAÇÃO	TEMPERATURA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DA CALDEIRA, °C				
	10	40	70	90	120
kgf/cm ²					
10	654	627	599	571	543
30	659	632	604	576	548
40	658	630	602	574	547

* obtido das tabelas de vapor, baseado na diferença entre as entalpias do vapor saturado e da água.

Tabela II.19 - Quantidade de Energia e eficiência dos combustíveis

TIPO DE COMBUSTÍVEL (unidade comercial)	QUANTIDADE DE ENERGIA (kcal / unidade comercial)	EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO (%)
Gás Natural (m ³)	9.165	81,7
Óleo Destilado N ^o .2 (litro)	9.230	84,6
Óleo Residual N ^o .6 (litro)	9.960	86,1
Carvão (kg)	6.800	87,6

*Nota: A eficiência da combustão é baseada em caldeiras equipadas com economizadores e pré-aquecedores de ar e 3% oxigênio nos gases da chaminé.

Exemplo: Uma caldeira, queimando gás natural, custando 110 US\$/10³ m³, produz vapor saturado a 30 bar com a água de alimentação da caldeira a 110°C. Usando os valores das tabelas, pode-se calcular o custo de produção do vapor.

$$\text{Custo do Vapor} = \frac{\text{Custo}_{\text{comb}} \times \text{Entalpia}_{\text{Vapor}}}{\text{PCI}_{\text{comb}} \times \eta_{\text{caldeira}}} \quad (\text{US\$/kg})$$

$$\text{Custo do Vapor} = (0,11 \times 560) / (9165 \times 0,817) = 8,17 \text{ US\$/t} = 24,50 \text{ R\$/t} \quad (1 \text{ US\$} = 3 \text{ R\$})$$

4.3 - Índices de referência de custo de geração de vapor no Brasil

Um dos principais índices de referência de desempenho de sistema de vapor é o custo unitário de geração do vapor, que está diretamente relacionado com a eficiência da caldeira. Pode ser determinado da seguinte forma:

$$\text{Custo do Vapor} = \frac{\text{Custo}_{\text{comb}} \times \text{Entalpia}_{\text{Vapor}}}{\text{PCI}_{\text{comb}} \times \eta_{\text{caldeira}}} \quad (\text{R\$/kg})$$

em que:

- Custo_{comb.} - Custo do combustível (R\$/t);
 PCI_{comb.} - Poder calorífico Inferior do combustível (kcal/kg);

Entalpia_{vapor} - Entalpia do vapor (kcal/kg); e
 η caldeira - Rendimento da caldeira (%).

A Tabela II.20 apresenta um resumo para a comparação entre os diversos resultados.

Tabela II.20 - Custo de produção de vapor por diferentes combustíveis

COMBUSTÍVEL	PCI kcal/kg	CUSTO DO COMBUSTÍVEL R\$/t	RENDIMENTO CALDEIRA %	PRODUÇÃO VAPOR kg/kg _{comb}	CUSTO DO VAPOR R\$/t
Lenha	2.500-3.300	58,9	60-75	2,7-4,4	13,33-22,00
Óleo Combustível 1A⁽¹⁾	9.600	1.070,00	80-85	13,7-14,6	73,43-78,02
GLP⁽²⁾	10.800	2380,00	80-88	15,4-17,0	140,24-154,26
Gás Natural⁽³⁾	kcal/m ³	R\$/103m ³	%	kg/m ³ _{comb}	R\$/t
Condição A *	9400	836,2	80-90	13,4-15,1	55,35-62,27
Condição B **	9400	781,5	80-90	13,4-15,1	51,73-58,20
Condição C ***	9400	699,5	80-90	13,4-15,1	46,30-52,09
Energia Elétrica	kcal/kWh	R\$/kWh	%	kg/kWh	R\$/t
Tarifa Convencional A4	860	0,1505	99	1,5	98,88
Tarifa Convencional A3a	860	0,1433	99	1,5	94,25
Tarifa Horosazonal Azul A4	860	0,1461	99	1,5	96,10
Tarifa Horosazonal Azul A3a	860	0,1386	99	1,5	91,16

Dados coletados em Agosto/2004

Observações: ⁽¹⁾ Preço da lenha de eucalipto: 20,00 [R\$/m³ st]; ⁽²⁾ preço de referência para o gás envasado em botijão de 45 kg; ⁽³⁾ preço médio do gás natural para distintas faixas de consumo: condição A: consumo de 8.000 m³/mês; condição B: consumo de 30.000 m³/mês; condição C: consumo de 80.000 m³/mês.

Nos cálculos dos valores apresentados na Tabela II.20 a foram consideradas as condições típicas de caldeiras industriais de porte médio, com gamas de rendimento e produção conforme mostrado e assumindo uma variação de 560 kcal/kg entre a entalpia da água de alimentação e o vapor produzido. A Tabela II.20 apresenta, para diversos combustíveis, o

custo do vapor produzido, conforme preços de combustível tomados em fins de 2004. Para o gás natural, foram adotados os valores praticados pela COMPAGAS na região metropolitana de Curitiba, segundo um estudo do Instituto paranaense Eivaldo Lodi (2004). Deve ser destacado o alto custo da produção de vapor: com eletricidade e com combustíveis de maior preço, como o GLP vendido em botijões e o custo, relativamente mais baixo das biomassas.

A Figura II.9 mostra um gráfico com os custos do vapor gerado por diferentes combustíveis, levando em consideração o rendimento da caldeira correspondente à queima de cada combustível.

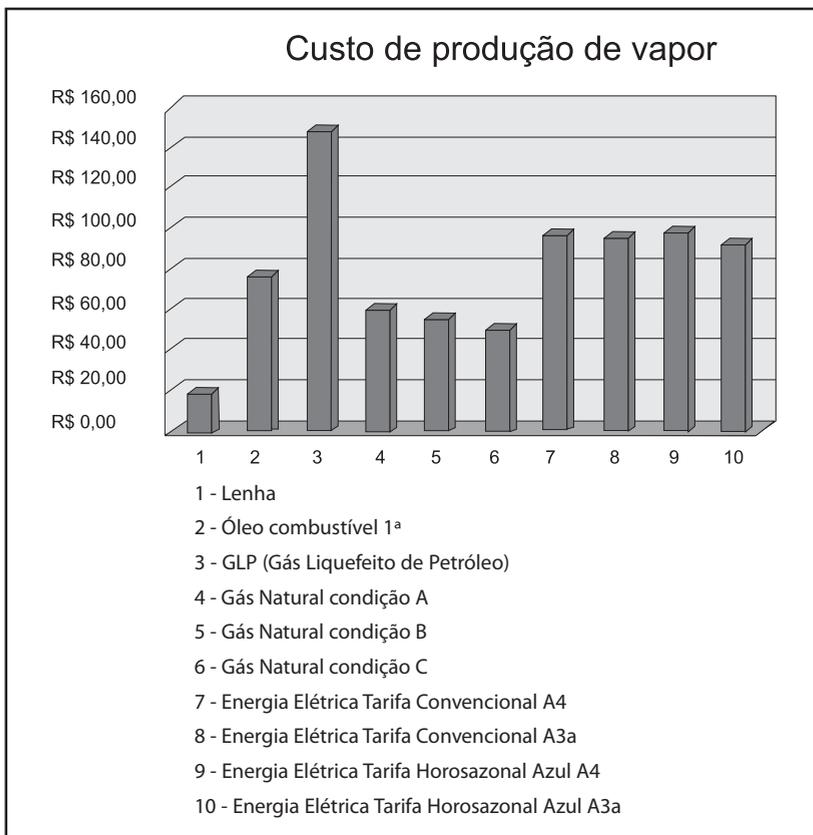


Figura II.9 - Custo do vapor gerado a partir de diferentes combustíveis

Exemplo - Cálculo do custo de vapor gerado por um combustível

Para ilustrar como se determina o custo do vapor, desenvolve-se a seguir uma aplicação para o óleo combustível 1 A. Os dados correspondentes são:

$$\begin{aligned} \text{Custo do combustível} &= 1,07 \text{ R\$/kg} \\ \text{PCI}_{\text{combustível}} &= 9600 \text{ kcal/kg} \\ \text{Entalpia do vapor} &= 560 \text{ kcal/kg} \\ \eta_{\text{caldeira}} \text{ (Rendimento da caldeira)} &= 80\% \end{aligned}$$

$$\text{Custo}_{\text{vapor}} = \frac{1070 \times 560}{9600 \times 0,80} = 78,02 \text{ R\$/t}$$

Para se ter um índice de comparação de custos no Brasil e nos EUA usando o exemplo do item 4.2 e os valores das tabelas para o gás natural, pode-se calcular o custo de produção do vapor.

$$\text{Custo do vapor} = \frac{\text{Custo do combustível}}{\text{PCI do combustível}} \times \frac{\text{Entalpia do vapor}}{\text{Eficiência da caldeira}}$$

Para estas mesmas condições, têm-se:

1. Custo do vapor nos EUA = 24,50 R\$/kg (para cotação do dólar de 3,00 reais);
2. Custo de vapor no Brasil = 62,53 R\$/kg (gás natural condição A);
3. Custo de vapor no Brasil = 58,44 R\$/kg (gás natural condição B); e
4. Custo de vapor no Brasil = 52,30 R\$/kg (gás natural condição C).

Como visto, o custo do vapor na Brasil é mais que o dobro que nos EUA, devido à diferenças no preço do gás natural.

4.4 - Custo efetivo do vapor

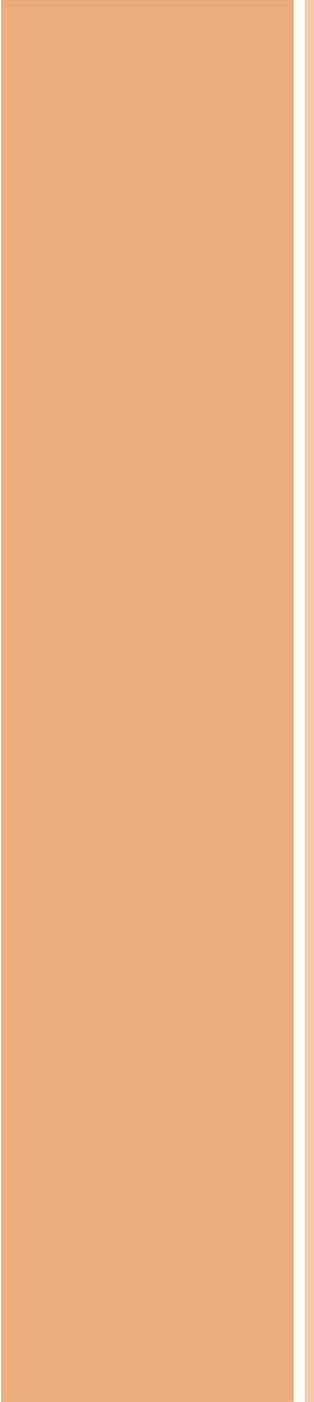
O custo efetivo do vapor depende do caminho que ele segue desde a caldeira até o ponto de uso. Utilize o enfoque sistêmico e considere todo o sistema de vapor, incluindo os efeitos de descarga de fundo, o consumo parasita de vapor na desaeração, etc, além das complicações surgidas em decorrência do fato de as cargas de vapor de processo usarem diferentes pressões, múltiplas caldeira e sistemas de recuperação de calor residual. Para determinar o custo efetivo do vapor, é interessante aplicar um modelo de simulação que inclua todos os fatores significativos.

Deve-se estar atento à distinção entre a eficiência da caldeira e aquela do sistema (ES); assim como entre o custo de geração de vapor e aquele do sistema. Os últimos podem ser assim definidos:

$ES = \text{energia utilizada (gerada - perdas)} / \text{energia total (combustível + energia elétrica)}$.

Custo específico é a relação entre o somatório de custos com energia, manutenção, logística, insumos, capital, dentre outros, e a quantidade real de calor utilizada (kcal utilizado).

Por exemplo, o custo de geração usando lenha é mais baixo do que quando se usa o gás natural, mas os demais custos, incluindo o de manipulação do combustível, "podem" ser menores. Por isso, para se obter a melhor decisão, devem-se avaliar todos os fatores. Isto é ser sistêmico.



PARTE III
FONTES DE CONSULTA

PARTE III - FONTES DE CONSULTA

1

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME PTC 4.1, *Steam Generating Units*, The American Society of Mechanical Engineers.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Inspecção de Segurança de Caldeiras Estacionárias**, ABNT-NB-55, Amostragem de Águas de Caldeiras, ABNT-NB-584

AVALLONE, E.; BAUMEISTER, T. *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill Book Company, 1999.

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 janeiro, 1989

Betz Handbook of Industrial Water Conditioning, 1980. Betz Laboratories.

BROWN, H. L.; HAMEI, B. B.; HEDMAN, B. A. **Energy analysis of 108 industrial processes**, Ed. Fairmont, 1985

FRYLING, G. *Combustion Engineering*, Combustion Engineering, 1966.

Getting the Most Out of Your Medium Steam Turbine-Generator, 1979. General Electric Company.

HART, U.S. Department of Energy, EE-24, 1000 Independence Avenue, SW,

HARTLEY, J.; WOODRUFF, G.; BLACK, W. **Thermodynamic Properties, Version 2.0 (software) to Accompany Thermodynamics**, Second Edition, Harper Collins Publishers, 1990.

INCROPERA, F., AND DEWITT, D. 1985. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2nd Edition, John Wiley and Sons.

KEMMER, F. *The Nalco Water Handbook*, 2nd Edition, McGraw Hill, 1988.

KNOXVILLE, Energy, Environment and Resources Center, 311 Conference Center Building, Knoxville, TN 37996-4134

Li, K. W., and Priddy, A. P. 1985. *Power Plant System Design*, John Wiley and Sons.

M. J. MORAN and H. N. SHAPIRO, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, 1992.

MAGRINI, R. O., **Riscos de acidentes na operação de caldeiras**, Ministério do Trabalho e Previdência Social, São Paulo, 1991

NEWMAN, KELLER, LYONS, WALES. *Modern Turbines*, General Electric. 1944.

NIST / ASME *Steam Properties Database: Version 2.2* (software), National Institute for Standards and Testing.

PERA, H., **Geradores de vapor**, Ed. FAMA, São Paulo, 1990

PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 6th Edition, McGraw-Hill Book Company, 1984.

PULL, E., **Caldeiras de Vapor**, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1989

RUSSELL, Alliance to Save Energy, 1200 18th Street, NW, Suite 900, Washington, DC

SHIELDS, C. D., **Boilers type; characteristics and functions**, MacGraw Hill, New York, 1982

Steam Its Generation and Use, 40th Edition, The Babcock and Wilcox Company, 1992.

Steam Its Generation and Use, The Babcock and Wilcox Company, 1978.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of Classical Thermodynamics**, John Wiley and Sons, 1973.

WEBER, W. *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, John Wiley and Sons, 1972.

White, F. M. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, 1979.

WOODRUFF, LAMMERS, AND LAMMERS. 1984. *Steam Plant Operation*, 5th Edition, McGraw-Hill Book Company.

2

LINKS ÚTEIS

<http://www.ielpr.com.br>

<http://www.spiraxsarco.com.br>

<http://www.eere.energy.gov/industry/>

<http://www.eere.energy.gov/industry/cfm/fullarticle.cfm/id=723>

<http://www.oit.doe.gov/bestpractices/steam/>

http://www.oit.doe.gov/bestpractices/software_tools.shtml#scope

<http://www.oit.doe.gov/bestpractices/steam/digest2002.shtml>

http://www.oit.doe.gov/bestpractices/technical_publications.shtml#steam

<http://www.oit.doe.gov/cgi-bin/cgiemail/bestpractices/steam/ssat.txt>

<http://www.oit.doe.gov/iac/tools.shtml>

<http://www.oit.doe.gov/redirects/oit.html>

<http://www.plantsupport.com/download/sd01art5.pdf>

http://www.plantsupport.com/download/steamtoolev10c01_112001.xls

http://www.reliabilityweb.com/pages/steaming_ahead.htm

<http://www.steamingahead.org>

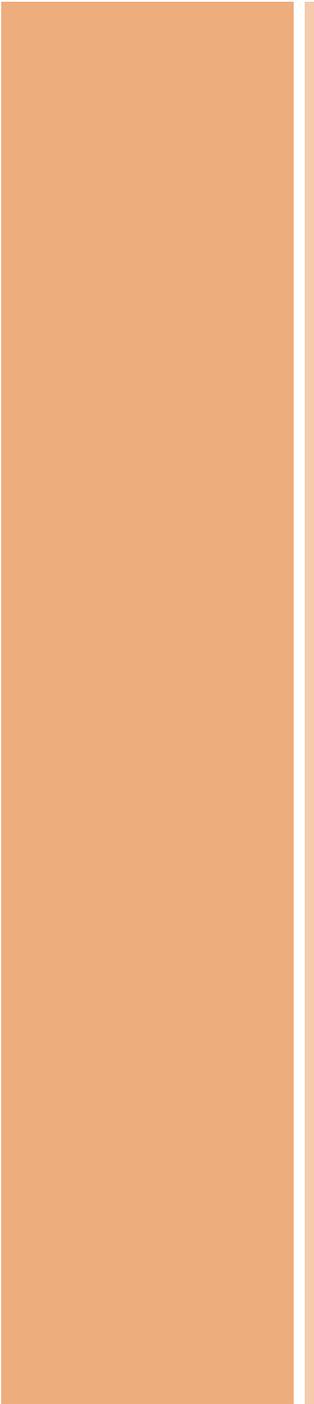
http://www.steamingahead.org/archives/2002_07-08.php

<http://www.steamingahead.org/gettingstarted.htm>

<http://www.uiof.org/best/steam/indexsteam.html>

http://www.wetrainindustry.com/class_advplantop.htm

http://www.wetrainindustry.com/class_descriptions.htm



APÊNDICES

Apêndice A

Resumo das áreas chaves de melhorias e pontuações para auxiliar na seleção das ações a serem implementadas.

ÁREA DE MELHORIA	O QUE FAZER	PONTUAÇÃO
Traçando o Perfil do Sistema de Vapor		
Custo do vapor	Identifique qual é o custo de produção de vapor da sua instalação (R\$/1000 kg) e use este resultado como um índice de referência (benchmark) para avaliar as oportunidades de melhoria nas operações de seu sistema de vapor. Inicie determinando o custo do combustível utilizado para produção de vapor, então adicione outros custos associados com a produção de vapor (eletricidade, produtos químicos, água bruta utilizada, mão de obra, etc.).	20
Vapor/Produto Índices de referência (benchmarks)	Identifique quanto de vapor é necessário para a fabricação dos principais produtos. Então rastreie este índice (benchmark): a) com de outras instalações em sua companhia; b) com de seus concorrentes; e c) com os índices de suas operações passadas.	20
Medições no Sistema de Vapor	Identifique os parâmetros operacionais chaves do vapor que devem ser monitorados e assegure-se que estejam sendo corretamente medidos.	50
Práticas Operacionais No Sistema de Vapor		
Manutenção dos purgadores de vapor	Implemente um programa que englobe a correta seleção, teste e manutenção dos purgadores de vapor.	40
Programa de tratamento de água	Implemente e mantenha um programa efetivo para o tratamento da água de alimentação em seu sistema de vapor.	30
Isolação térmica do sistema	Assegure que componentes de seu sistema estejam bem isolados. Determine a espessura econômica de isolamento para os componentes de seu sistema e desenvolva uma revisão da isolação do sistema para identificar superfícies expostas e/ou com o isolamento danificado que poderiam estar corretamente isoladas.	30
Vazamentos de vapor	Identifique e, rapidamente, repare vazamentos de vapor em seu sistema de vapor.	10
Golpe de aríete	Detecte e, rapidamente, elimine golpe de aríete em seu sistema de vapor.	10
Operações de manutenção do sistema de vapor	Estabeleça e execute um programa efetivo de manutenção global do sistema de vapor.	20
Práticas Operacionais na Planta da Cadeira		
Eficiência da caldeira	Realize medições e procure por oportunidades para a melhoria da eficiência em sua caldeira.	35
Equipamentos de recuperação de calor	Analise a possibilidade de instalação de equipamentos de recuperação de calor nas instalações da caldeira.	15
Geração de vapor seco	Assegure-se de que sua caldeira esteja gerando vapor seco de alta qualidade.	10
Condições gerais de operação da caldeira	Assegure-se de que sua caldeira desempenhe suas funções sem grandes flutuações nas condições operacionais	20
Práticas Operacionais na Distribuição de Vapor, no Uso Final, e na Recuperação		
Minimização do fluxo de vapor em válvulas redutoras de pressão	Investigue o potencial de substituição das válvulas redutoras de pressão por turbinas de contrapressão em seu sistema de vapor.	10
Recuperação e utilização do condensado disponível	Determine quando do condensado disponível está sendo recuperado e utilizado.	10
Uso do condensado de alta pressão para produzir vapor de baixa pressão	Investigue o uso do condensado de alta pressão para produzir vapor utilizável de baixa pressão.	10

Apêndice B

Plano de Ação Alternativo

Este Plano de Ação está dividido em diretrizes organizadas para auxiliar os usuários de sistemas de vapor a obedecerem às seguintes etapas na identificação de oportunidades para melhorar a eficiência de seus sistemas de vapor.

- 1) A base de análise deve ser determinada. Indicativos são fornecidos para traçar o perfil de um sistema de vapor individual. Métodos são apresentados para estimar o custo do combustível e as características operacionais da instalação para identificar as melhorias na eficiência energética que resultem em redução nos custos operacionais.
- 2) As propriedades do vapor da instalação devem ser identificadas para permitir que cálculos sejam efetuados nas seções posteriores de análises.
- 3) A operação da caldeira é investigada. Esta análise concentra-se na avaliação da eficiência da caldeira na conversão da energia do combustível para o vapor.
- 4) A área de análise está relacionada com a utilização ao longo de toda a instalação. As principais preocupações nesta área são: utilização do combustível mais apropriado, manutenção do balanço adequado da pressão do vapor ao longo de todo o sistema e a integração do processo energético.
- 5) Investiga as perdas de energia ao longo do sistema distribuição. As principais categorias de perdas são: vazamentos de vapor, perda de calor no isolamento térmico insuficiente e não recuperação do condensado.

TRAÇANDO O PERFIL DO SISTEMA DE VAPOR

- a) Determine o custo total de combustível fornecido a caldeira (R\$/ano, R\$/mês).
- b) Calcule o custo unitário do combustível com base na energia (R\$/10⁶ kcal).
- c) Compare o custo unitário do combustível utilizado com outros combustíveis disponíveis.
- d) Determine o custo unitário da energia elétrica fornecida à instalação (R\$/10⁶ kcal).
- e) Compare o custo unitário do combustível ao da energia elétrica fornecida à instalação.
- f) Determine a produção típica de vapor da instalação (kg/h).
- g) Determine o custo de produção do vapor da instalação (R\$/10³ kg).
- h) Determine a quantidade de vapor necessária à produção de um produto (kg vapor / kg produto).

IDENTIFICANDO AS PROPRIEDADES DO SISTEMA DE VAPOR

- a) Determine as propriedades do vapor gerado nas caldeiras (temperatura, pressão, vapor saturado, superaquecido e entalpia) e as demais propriedades termodinâmicas.
- b) Determine as propriedades da água de alimentação da caldeira (temperatura, pressão e entalpia).
- c) Determine as propriedades da água da descarga de fundo da caldeira (pressão e entalpia).
- d) Determine as propriedades do condensado de retorno (temperatura).
- e) Determine as propriedades da água captada para alimentação da caldeira (temperatura).

MEDINDO A EFICIÊNCIA DA CALDEIRA

- a) Determine eficiência da caldeira (%).
- b) Verifique os pontos quentes no costado (estrutura externa).
- c) Determine a taxa de descarga de fundo da caldeira (% do fluxo da água de alimentação, kg/h).
- d) Investigue as oportunidades de melhoria na qualidade da água de alimentação.
- e) Avalie as oportunidades de recuperação de calor da descarga de fundo da caldeira.
- f) Monitore o teor de oxigênio nos gases da chaminé (%).
- g) Monitore a temperatura dos gases de exaustão na chaminé com respeito a: demanda de vapor da caldeira, temperatura ambiente e teor de oxigênio nos gases de exaustão .
- h) Monitore os gases combustíveis na chaminé (ppm).
- i) Avalie a perda de carbono não queimador (%).

EFICÁCIA NA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS

- a) Desenvolva um diagrama esquemático do sistema de vapor.
- b) Desenvolva um balanço de massa e energia para o sistema.
- c) Avalie a possibilidade de utilização de combustíveis alternativos.
- d) Monitore a vazão de vapor através das descargas e estações de redutoras de pressão.
- e) Analise o efeito da mudança da atual pressão de operação da caldeira.

PERDAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

- a) Encontre e conserte os vazamentos de vapor.
- b) Implemente um programa de gerenciamento dos purgadores de vapor.
- c) Investigue as áreas com potencial para retorno do condensado.
- d) Avalie as condições dos isolamentos térmicos.
- e) Verifique as oportunidades de reaproveitamento do vapor flash.

Apêndice C

Medidas do impacto financeiro da eficiência do vapor

O primeiro passo é identificar e enumerar o impacto financeiro total de uma medida de melhoria na eficiência do vapor. Uma estrutura para esta finalidade é conhecida como "análise de custo de ciclo de vida". Estas análises capturam o total de soma das despesas e dos benefícios associados com um investimento. Os resultados - ganho ou perda líquido no balanço - podem ser comparados a outras opções do investimento ou ao resultado antecipado se nenhum investimento for feito. Como uma contabilidade detalhada de uma opção do investimento, a análise de custo durante a vida útil (life-cycle) para uma medida da eficiência do vapor incluiria:

- custos de pesquisa e seleção de empresa de engenharia para execução dos projetos;
- custo do capital Inicial, incluindo o custo de aquisição, instalação, e custos de empréstimos;
- custos de manutenção;
- custos de materiais de consumo;
- custos de energia sobre a vida econômica da execução;
- impactos das taxas depreciação e dos impostos;
- valor de sucata ou custo da eliminação no fim da vida econômica do equipamento; e
- impactos na produção, tais como: qualidade de produto e redução de tempo de produção.

Uma revelação que emerge tipicamente deste exercício é que os custos de combustível podem representar até 96% dos custos no período de vida útil, enquanto o gasto com capital inicial é de somente 3% e o de manutenção é de 1%.

Essas constatações são verdadeiras para caldeiras com um período de vida útil de 20 anos que operam com níveis elevados de utilização da capacidade. Claramente, qualquer medida de redução do consumo de combustível certamente resultará em ganhos financeiros positivo para a empresa.

