

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
CÂMPUS CAMPO MOURÃO - PARANÁ

ANDRESSA CARLA CINTRA DA SILVA

**CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS
DE VAPOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2013

ANDRESSA CARLA CINTRA DA SILVA

CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia de Alimentos da Coordenação dos Cursos de Tecnologia e Engenharia de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, câmpus Campo Mourão, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Alimentos.

Orientadora: Prof^a Dr^a Karla Silva

CAMPO MOURÃO
2013



TERMO DE APROVAÇÃO

CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR

por

ANDRESSA CARLA CINTRA DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 02 de maio de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profª Drª Karla Silva
Prof.(a) Orientador(a)

Profª Msc Leila Larisa Medeiros Marques
Membro titular

Profª Drª Mirela Vanin dos Santos Lima
Membro titular

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela benção da vida, essa oportunidade maravilhosa de crescimento, aprendizado e evolução. Obrigada Pai, por Sua luz que ilumina meu caminho, Seu amor que me ampara e Sua justiça perfeita que me consola.

Agradeço eternamente a minha família, pelo amor e apoio incondicional. Especialmente à minha avó, meu pai e minha mãe, que são minha referência, meu porto seguro em qualquer situação.

Toda minha gratidão à Professora Karla, por acreditar em mim e me inspirar a aprender e buscar sempre mais. Com certeza contraí uma dívida.

Agradeço também aos Professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Campo Mourão, que participaram de alguma forma da minha graduação. Levarei para toda vida o conhecimento que vocês compartilharam comigo.

Muito Obrigada!

“Na natureza nada se cria, nada
se perde, tudo se transforma”
(LAVOISIER, Antoine Laurent, 1774).

RESUMO

SILVA, A. C. C. **Conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor**. 2012. 196f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

A disponibilidade dos recursos energéticos de um país define seu desenvolvimento socioeconômico, tornando imprescindível o uso eficiente e sustentável desses recursos. Segundo a Confederação Nacional da Indústria, 82% das oportunidades de economia de energia estão nos processos térmicos e não no consumo de eletricidade. O vapor é uma das fontes de energia mais utilizadas pela indústria, devido seu alto conteúdo energético, baixo custo e fácil obtenção. No Brasil, o vapor corresponde a 54% da demanda total de energia do setor industrial, representando cerca de 20% do consumo energético nacional. Estudos indicam que é possível conter desperdícios de insumos na ordem de 30% a custo zero e ainda reduzir o consumo energético em até 20%. Entretanto, a implementação de um programa de conservação e gerenciamento de energia depende do reconhecimento e aplicação dos conceitos básicos de termodinâmica, reconhecendo as quantidades e qualidades dos fluxos energéticos e impacto relativo dos parâmetros nos processos, pelo corpo técnico atuante no processo. Isso reverte à necessidade de materiais para treinamento e que forneçam os conhecimentos necessários e suficientes ao gerenciamento energético. O presente trabalho propôs um diagnóstico desse contexto utilizando como espaço amostral uma indústria exportadora de grande porte e acadêmicos de engenharia. Identificou-se a necessidade de se concatenar em um único material os conceitos básicos de engenharia e procedimentos para quantificar a energia (balanço energético) e qualificá-la (balanço exergético), culminando em um guia para aproveitamento energético em sistemas de vapor. O manual resultante foi submetido à avaliação de acadêmicos de engenharia através de entrevistas, aumentando em 58,8% a motivação nos estudos e sendo aprovado por 88,2% como documento de referência. O documento, que apresenta as etapas imprescindíveis em auditoria energética de unidade industrial, foi ainda sugerido para treinamento do corpo técnico da unidade industrial parceira. Concluindo, obteve-se um material de referência para estudantes e profissionais interessados na racionalização na geração, distribuição e utilização eficiente do vapor.

Palavras-chave: Sistema de vapor. Eficiência energética. Auditoria Energética. Energia. Exergia.

ABSTRACT

SILVA, A. C. C. Management and conservation of energy in steam systems. 2012. 196f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

The availability of energy resources of a country defines its socioeconomic development, making it essential to efficient and sustainable use of these resources. According to the National Confederation of Industry, 82% of energy savings opportunities are in thermal processes and not in electricity consumption. Steam is one of the energy sources used by the industry because of its high energy content, low cost and easy to obtain. In Brazil, the vapor corresponds to 54% of total energy demand in the industrial sector, accounting for about 20% of national energy consumption. Studies indicate that it is possible to contain waste inputs in the order of 30% at zero cost and still reduce energy consumption by up to 20%. However, the implementation of a program of conservation and energy management depends on recognizing and applying the basic concepts of thermodynamics, recognizing the quantities and qualities of energy flows and relative impact of the parameters in the processes, the technical staff active in the process. This reverses the need for training materials and provide the necessary knowledge and sufficient to energy management. This paper proposed a diagnosis of this context using sample space as an export industry and large academic engineering. We identified a need to concatenate into a single material engineering basic concepts and procedures for quantifying energy (energy balance) and qualify it (exergetic balance), culminating in a guide for energy in steam systems. The resulting manual was submitted to the academics interviewed, increasing by 58.8% motivation in studies and was approved by 88.2% as a reference document. The document, which presents the essential steps for energy audit of an industrial unit was even suggested for training the body of the unit's industrial partner. In conclusion, we obtained a reference material for students and professionals interested in streamlining the generation, distribution and efficient use of steam.

Keywords: Steam system. Energy Efficiency. Energy Audit. Energy. Exergy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 DESENVOLVIMENTO	14
3.1 DIAGNÓSTICO	14
3.2 PESQUISA DE CAMPO	14
3.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.3.1 Resultados da Revisão Bibliográfica	16
4 CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS	21
ANEXO A – MANUAL DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA	23

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que de 20 a 50% da energia direcionada à produção industrial seja perdida como calor residual nos gases de exaustão, águas de aquecimento, fluidos, superfícies de equipamentos e produtos aquecidos (BCS, 2008). Considerando a necessidade da eficiência energética, a recuperação desse calor residual constitui uma oportunidade atrativa como fonte energética alternativa e de baixo custo implicando na sustentabilidade industrial.

A adoção de medidas que compreendam a diminuição da quantidade de energia primária necessária é imprescindível para a competitividade industrial bem como uso eficiente dos recursos naturais. Mas isso está intrínseco a um programa educativo focado na apresentação das possibilidades para uso eficiente de insumos energéticos visando padrão de produção mais eficaz.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2002), o consumo energético industrial é composto de vapor (34%); combustível (47%) e eletricidade (19%). A Indústria converte cerca de 70% do combustível que adquire em vapor. De todas as formas de energia (incluindo insumos e energia elétrica) compradas pelo setor, 34% são destinados à produção de vapor.

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (2012), ano-base 2011, a indústria representa 36% do consumo da matriz energética nacional. Com relação ao vapor, o Balanço Energético Nacional (2003), com dados de 2002, estimou, que 54% da demanda total de energia na indústria, correspondendo a aproximadamente 20% da demanda total de energia do país, estão associados à geração de vapor.

Vapor é usado como meio de transmissão de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial (RODRIGUES, 2012). É gerado principalmente a partir da água, composto mais abundante da Terra e, portanto de fácil obtenção e baixo custo. Sua temperatura pode ser controlada com precisão através do controle da pressão. Tem alto conteúdo energético por unidade de massa e volume e ao retornar ao estado líquido, cede essa energia ao meio que se deseja aquecer. Pode ser facilmente transportado por tubulações, percorrendo grandes distâncias entre os pontos de geração e utilização (ELETROBRAS, 2005b; BABCOCK & WILCOX, 1985; SPIRAX SARCO, 2004; RODRIGUES, 2012). Assim, tornou-se uma

importante fonte de energia para indústria fornecendo inúmeros benefícios na sua utilização, conjugando baixo preço, elevada densidade energética e altas taxas de transferência de calor (ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência do sistema é entendida como a relação entre a quantidade de energia inserida com a quantidade de energia consumida ou útil (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; WANG, 2009). Ela abrange o conjunto de ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perda na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

A eficiência energética de um sistema pode ser obtida através das avaliações energéticas identificando parâmetros termodinâmicos, como quantidade de trabalho realizado e calor transferido. Utilizando a termodinâmica como ferramenta analítica é possível determinar as perdas de energia, contabilizando os fluxos energéticos do sistema e classificando-os quantitativamente e qualitativamente. As avaliações irão auxiliar na determinação dos pontos de desperdício e locais que tenham margem para implementação de melhorias. (ELETROBRAS, 2007; WANG, 2009; ÇENGEL; BOLES, 2007).

Estudos indicam que é possível conseguir uma redução de desperdícios de insumos na ordem de 20 a 30% sem capital de investimento, utilizando apenas mudanças operacionais e de comportamento (FISHER; BLACKMAN; FINNELL, 2007). O custo efetivo do consumo de energia das indústrias pode ser reduzido de 10 a 20% através de um programa bem estruturado de gerenciamento energético que combine tecnologia, controle de práticas operacionais e um plano de conservação de energia (CAPEHART; SPILLER; FRAZIER, 2006).

A implementação de um programa de medidas gerenciais e operacionais para a melhoria da eficiência energética na geração, distribuição e utilização do vapor pode reduzir as perdas e desperdícios de energia, como demonstra a experiência brasileira e a internacional (ELETROBRAS, 2005a).

Entretanto, a falta de preparo e orientação dos usuários e responsáveis pelos sistemas energéticos leva a um dos atrasos mais relevantes para efetivar ações na direção da racionalização e uso eficiente da energia. É necessário dar condições para a compreensão da concepção, operação e manutenção otimizadas dos sistemas a vapor (ELETROBRAS, 2005a).

O gerenciamento energético, ou utilização eficaz da energia e a gestão das fontes energéticas em instalações industriais, é inerente à redução dos custos de processamento, conservação das fontes energéticas não renováveis e redução do impacto ambiental (BOYD, 2011). Considerando que indústria alimentícia consome grandes quantidades de energia e gera grandes quantidades de resíduos, a conservação e recuperação energética a partir de processamento de resíduos tornam-se aspectos fundamentais para redução de custos de produção, manutenção do crescimento econômico e melhoria da sustentabilidade industrial (WANG, 2009). Um projeto de conservação e gerenciamento de energia minimiza a energia consumida e propõe a utilização de fluxos de resíduos, sólidos ou energéticos, como fontes de energia alternativa (WANG, 2009). As organizações que estabelecem um programa de gerenciamento energético estratégico adotam uma série de atividades que, se realizada adequadamente, tem potencial para economia e mesmo sustentabilidade energética (BOYD, 2011).

Um projeto energético inicia-se com a análise de energia, que normalmente requer dados de auditoria energética, para se identificar pontos do processo passíveis de intervenções para otimização do fluxo energético (WANG, 2009). A análise do consumo energético e sua eficiência no processamento de alimentos envolvem aplicação dos princípios científicos e de engenharia como física, química, termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos. A perda de energia pode ser interpretada pela perda do conteúdo energético usando a primeira lei da termodinâmica, mas embora amplamente utilizado, esse método não pode mostrar como e onde as irreversibilidades ocorrem no sistema ou processo e nem garante a ocorrência ou não de um processo: a direção de ocorrência de um processo energético só pode ser descrita pela segunda lei da termodinâmica (ÇENGEL; BOLES, 2007). Usando a segunda lei medem-se as perdas termodinâmicas e as perdas da qualidade energética, através do parâmetro definido como exergia (MORAN; SHAPIRO, 2009). Isso incide sobre a necessidade de avaliação individual dos processos e revisão dos conceitos termodinâmicos numa expectativa de mensura da eficiência exérgica caso a caso.

Uma pesquisa junto a indústrias paranaenses sustenta a tese de que a adoção de novas medidas governamentais, incentivando a substituição dos equipamentos e processos obsoletos e racionalizando o uso dos recursos naturais, resultaria em eficiência energética (SOLA; KOVALESKI, 2004). Em consenso, a

Confederação Nacional da Indústria disponibilizou relatório (CNI, 2005) onde diagnostica o momento como propício para maior dinamismo nas ações de eficiência energética no Brasil e salienta que, embora o setor industrial seja o maior consumidor nacional de energia, não é de fato prioridade nos programas governamentais de gerenciamento energético para sustentabilidade. Mas, ainda nesse relato fundamentado na análise de projetos para eficiência energética de diversos setores da indústria, ressalta-se que 82% das oportunidades de economia de energia estão nos processos térmicos e não no consumo de eletricidade. Neste cenário, configura-se ainda: por um lado a indústria, comprometida com a excelência dos produtos e inserida nos processamentos já estabelecidos, que não dispõe em si de recursos suficientes para obter conhecimentos e habilidades tecnológicas avançadas sobre conservação energética; por outro lado, a academia que não vivencia a realidade prática das linhas de produção, tão necessária a aplicação dos conhecimentos teóricos.

Torna-se assim eminente a realização de trabalhos em conjunto empresa-universidade, aliando a experiência prática industrial ao conhecimento teórico acadêmico e delineando estratégias eficazes ao avanço em conservação e tecnologias de conversão de energia, eficiência energética e recuperação energética nas instalações de processamento de alimentos. Inserido neste contexto e devidamente estimulado, o acadêmico torna-se parte do conjunto de ações que delinearão a continuidade do projeto de pesquisa em eficiência energética.

Nessa conjuntura, o presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um guia de informações técnicas e práticas úteis para melhoria do desempenho energético de um sistema de vapor com a implementação de um programa de conservação e gerenciamento de energia que resulte no uso responsável dos recursos naturais e energéticos, bem como no aumento da competitividade dos setores produtivos e de serviços do país. Com a adoção do programa é possível obter um plano de ação que conjugue eficiência energética, redução de custos e aumento da sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar um manual de treinamento em eficiência energética de sistemas de vapor para as indústrias, direcionado aos profissionais das indústrias de alimentos e demais responsáveis por esses sistemas energéticos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a situação prática atual e necessidades na indústria quanto a eficiência energética de sistemas de vapor;
- Verificar a acessibilidade de acadêmicos e técnicos, interessados na fundamentação para avaliação do uso racional e eficiente de sistemas de vapor, a materiais que fundamentem esse procedimento;
- Revisar conceitos fundamentais de termodinâmica, operações unitárias, fenômenos de transportes, instalações e instrumentação industrial, aplicados às instalações de vapor industriais;
- Apresentar um sistema de vapor típico para geração de vapor saturado e caracterizar a operação dos sistemas que o compõe: geração, distribuição, utilização e o retorno de condensado;
- Apresentar as oportunidades de conservação de energia mais comuns identificadas em sistemas de vapor durante a geração, distribuição, utilização e o retorno de condensado;
- Verificar os conceitos aplicados à avaliação da eficiência energética e exergética;
- Descrever procedimentos para auditoria energética;
- Estabelecer etapas para implementação de um programa de conservação e gerenciamento de energia em um sistema de vapor;

- Fornecer informações práticas e técnicas para identificação de oportunidades de conservação de energia em sistemas de vapor;
- Fornecer subsídios para programa de gerenciamento energético direcionado ao profissional da indústria.

3 DESENVOLVIMENTO

As etapas de desenvolvimento do presente trabalho consistiram no levantamento e identificação das necessidades industriais e acadêmicas de um manual para eficiência energética do vapor por verificação da disponibilidade, da acessibilidade e do aproveitamento das informações técnicas disponíveis para implementação de programa de eficiência energética na indústria de alimentos usuária do vapor como fonte energética (Diagnóstico); acessibilidade, motivação e aproveitamento acadêmico ao material de referência disponível (Pesquisa de Campo); concatenação de materiais de referência nacionais e internacionais com informações teóricas e práticas uso eficiente do vapor como forma de energia (Revisão Bibliográfica); avaliação do material elaborado (Teste de Aceitação).

3.1 DIAGNÓSTICO

Estabeleceu-se uma parceria com indústria multinacional do ramo alimentício, doravante nomeada “Xis Ltda.”. Foram feitas reuniões com os atuantes dos diferentes níveis hierárquicos dessa empresa (diretor industrial, gerente industrial, gerente de projetos, supervisor de processos e de projetos) para levantamento de objetivos estabelecidos, procedimentos executados e dificuldades encontradas durante implantação de programa para eficiência energética nos processos. Os entrevistados apontaram a escassez de material de treinamento ao quadro técnico operacional do sistema de vapor.

3.2 PESQUISA DE CAMPO

A acessibilidade e aproveitamento de materiais de referência para treinamento em sistemas de vapor também foi avaliada na população acadêmica: 28 acadêmicos da disciplina de Instalações Industriais (7º período de Engenharia de

Alimentos) foram submetidos ao treinamento em sistemas de vapor sugerido pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP - United Nations Environment) e disponibilizado em Power Point®. Foram sugeridos estudos complementares em materiais de referência bibliográfica da disciplina, promovendo-se posteriormente discussões abertas sobre o tema. Constatou-se uma carência de material acadêmico especificamente direcionado a instalações de vapor em indústrias de alimentos, com informações atualizadas e ênfase a busca de soluções sustentáveis, unindo as disciplinas básicas e as específicas aplicadas no sistema. Isso culminou com uma participação de cerca de 2% dos alunos nas discussões sobre o tema.

Foram então concatenados os materiais técnicos e científicos de diferentes referências bibliográficas resultando em um “Manual de Conservação e Gerenciamento de Energia em Sistemas de Vapor” e sugerida a leitura aos 28 acadêmicos, para posterior avaliação. Após a leitura, constatou-se um aumento de cerca de 70% na participação dos acadêmicos nas discussões abertas do tema. O resultado da avaliação do material elaborado está apresentada na Tabela 1. A nota atribuída ao material foi de $9,1 \pm 0,7$ (escala de 0 a 10).

Tabela 1. Resultado da avaliação do material elaborado.

% de acadêmicos	Parâmetro avaliado
58,8	Conteúdo motivador
64,7	Material fundamental
88,2	Material fortemente indicado

3.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram utilizadas base de dados, nacionais e internacionais, dos segmentos acadêmicos (indexadas), industriais (manuais de fornecedores de equipamentos) e técnicos (apostilas de treinamentos de pessoal técnico). Como resultado final dessa revisão bibliográfica obteve-se o Manual para Conservação e Gerenciamento de Energia em Sistemas de Vapor, apresentado no Anexo A.

3.3.1 Resultados da Revisão Bibliográfica

Visando facilitar a visualização do conteúdo, especifica-se a seguir o sumário do Manual para Conservação e Gerenciamento de Energia em Sistemas de Vapor, parte integrante do presente trabalho.

1. INTRODUÇÃO
- 2.1. GERANDO VAPOR
- 2.2. QUALIDADE DO VAPOR
- 2.3. ASPECTO ECONÔMICO
3. CONCEITOS E UNIDADES
- 3.1. PRESSÃO
- 3.2. TEMPERATURA
- 3.3. VOLUME ESPECÍFICO
- 3.4. TABELAS DE VAPOR SATURADO
- 3.5. VAZÃO
- 3.6. CONDENSAÇÃO
- 3.7. VAPOR FLASH
- 3.8. ENERGIA TÉRMICA
- 3.8.1. Calor Sensível
- 3.8.2. Calor Latente
- 3.8.3. Calor Total
- 3.9. ENTROPIA
- 3.10. PODER CALORÍFICO
4. SISTEMA DE VAPOR TÍPICO
- 4.1. GERAÇÃO DE VAPOR
- 4.2. DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR
- 4.3. UTILIZAÇÃO DE VAPOR
- 4.4. RETORNO DO CONDENSADO
- 4.5. PERDAS TÉRMICAS
5. OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA GERAÇÃO DE VAPOR
- 5.1. CALDEIRAS

5.2. PERDAS NA CASA DE CALDEIRA

5.2.1. Calor nos Gases da Chaminé

5.2.2. Excesso de Ar na Combustão

5.2.3. Temperatura da Água de Alimentação

5.2.4. Pré-aquecedor de Ar

5.2.5. Transferências de Calor no Costado da Caldeira

5.2.6. Calor na Descarga de Superfície

5.2.7. Calor na Descarga de Fundo

5.2.8. Calor na Combustão de Biomassa Úmida

5.3. RENDIMENTO DA CALDEIRA

5.3.1. Custo da Geração de Vapor

5.3.2. Eficiência da Caldeira

6. OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

6.1. TUBULAÇÃO

6.1.1. Dimensionamento

6.2. ISOLAMENTO TÉRMICO

6.3. ALAGAMENTO

6.4. DRENAGEM DO CONDENSADO

6.4.1. Pontos de Drenagem

6.4.2. Drenagem Coletiva

6.5. PURGADORES

6.5.1. Métodos de Avaliação de Purgadores

6.6. SEPARADORES DE UMIDADE

6.7. PRESENÇA DE AR

6.8. VAZAMENTOS

7. OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR

7.1. REDUÇÃO DE PRESSÃO

7.2. CONTROLES DE PROCESSO

7.3. ÁREAS DE TROCA TÉRMICA

7.4. ACUMULADOR DE VAPOR

7.5. INJEÇÃO DIRETA DE VAPOR

7.6. EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

- 7.6.1. Secadores
- 7.6.2. Evaporadores
- 7.6.3. Trocadores de Calor
- 7.6.4. Termocompressores
- 7.6.5. Traceamento
- 8. OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO RETORNO DO CONDENSADO
 - 8.1. GERENCIAMENTO DO CONDENSADO RESIDUAL
 - 8.2. LINHAS DE RETORNO
 - 8.3. RETORNO ALAGADO E POR GRAVIDADE
 - 8.4. BOMBEAMENTO DO CONDENSADO
 - 8.5. APROVEITAMENTO DE VAPOR FLASH
 - 8.6. TANQUES COLETORES E DE ALIMENTAÇÃO
- 9. RENDIMENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE VAPOR
 - 9.1. QUALIDADE DA ENERGIA TÉRMICA
 - 9.2. BALANÇOS DE MASSA, ENERGIA E EXERGIA DOS COMPONENTES OU OPERAÇÕES QUE COMPÕEM O SISTEMA
 - 9.2.1. Balanço de Massa
 - 9.2.2. Balanço de Energia
 - 9.2.3. Balanço de Exergia
 - 9.2.4. Avaliação da Eficiência Energética e Exergética
- 10. PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA
 - 10.1. AUDITORIAS DE ENERGIA
 - 10.2. ANÁLISE FINANCEIRA DE PROJETOS
 - 10.2.1. Fluxo de Caixa
 - 10.2.2. Retorno de Investimento
 - 10.2.3. Custo de Capital
 - 10.2.4. Período de Recuperação do Investimento ou Payback
 - 10.2.5. Payback Descontado
 - 10.2.6. Valor Presente Líquido
 - 10.2.7. Taxa Interna de Retorno
 - 10.2.8. Taxa Mínima de Atratividade
- 11. METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR

11.1. INICIANDO A IMPLEMENTAÇÃO

11.2. LEVANTAMENTO DE DADOS PARA PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

11.3. GERENCIANDO A IMPLANTAÇÃO DOS RESULTADOS PLANEJADOS

11.4. MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO

12. CONCLUSÃO

13. REFERÊNCIAS

ANEXO A – TABELA DE VAPOR SATURADO

ANEXO B – AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

ANEXO C – ANÁLISE FINANCEIRA DE PROJETOS

ANEXO D – DOCUMENTAÇÃO EXIGIDA AO SISTEMA DE GESTÃO
ENERGÉTICA

4 CONCLUSÃO

A partir de dados práticos, constatou-se a necessidade de revisão bibliográfica para elaboração de manual para conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor. O documento elaborado foi submetido a avaliação de acadêmicos e corpo técnico atuante, obtendo aprovação significativa para ser adotado como material necessário e suficiente à implantação de auditorias para avaliação e otimização da eficiência energética em sistemas de vapor.

REFERÊNCIAS

BABCOCK & WILCOX. **Steam: Its Generation and Use**. New York: Babcock & Wilcox, 1985.

BEN-2003. **Balanco Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, 2003.

BEN-2012. **Balanco Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, 2012.

BCS, Incorporated. **Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry**. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 112p. 2008.

BOYD, Gale. A. **Development of Performance-based Industrial Energy Efficiency Indicator for Food Processing Plants**. U.S. Environmental Protection Agency-Energy Star Program, 2011. Disponível em: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Food_EPI_Documentation>. Acesso em: 19 set. 2011.

CAPEHART, Barney. L.; SPILLER, Mark B.; FRAZIER, Scott. **Energy Management Handbook**. 6 ed., Lilburn: The Fairmont Press, 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 5 ed. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

CNI, Confederação Nacional da Indústria; Unidade de Competitividade Industrial (COMPI). **Eficiência Energética na Indústria**. Brasília-DF. 2005. Disponível em: <www.cni.org.br> Acesso em: 20 set. 2011.

ELETROBRAS. Guia Técnico: **Gestão energética**. ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005a.

_____. Manual Prático: **Eficiência energética no uso de vapor**. ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005b.

_____. Eficiência Energética: Teoria & Prática. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO Universidade federal de Itajubá – UNIFEI FUPAI. Itajubá, 2007.

FISCHER, James R.; BLACKMAN, Jordan E.; FINNELL, Janine A. Industry and Energy: Challenges and opportunities. **Engineering & Technology for a Sustainable World**, n.4, p. 8-9, 2007.

GODOI, José M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, Silvio. **Gestão da eficiência energética**. In: II International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2009.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NASCIMENTO JUNIOR, Cleber M.; SARTORELLI, Ricardo J. Geração de energia por meio do vapor. **Coletânea de trabalhos – Qualidade de energia e tecnologias de uso final**, n.2, p.13-17, 2009.

RODRIGUES, Marcos L. M. **Curso Eficiência Energética em Sistemas de Vapor**. DATTE: Educação & Treinamento. Belo Horizonte, 2012.

SOLA, Antonio V. H.; KOVALESKI, João L. **Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades**. In: XXIV Encontro Nac. de Eng. De Produção. Florianópolis-SC. 2004. Disponível em: <<http://www.pg.cefetpr.br/ppgep/Ebook/ARTIGOS/81.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2011.

SPIRAX SARCO. **Design of Fluid Systems: Steam Utilization**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2004.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Best Practices: Steam Overview**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2002

WANG, Lijun. **Food Efficiency and Management in Food Processing Facilities**. London: CRC Press,. 452p. 2009

ANEXO A – Manual de conservação e gerenciamento de energia



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
CÂMPUS CAMPO MOURÃO - PARANÁ

Manual para Conservação e Gerenciamento de Energia em Sistemas de Vapor

Acadêmica: Andressa Carla Cintra da Silva

Orientadora: Profa. Dra. Karla Silva

CAMPO MOURÃO

2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela benção da vida, essa oportunidade maravilhosa de crescimento, aprendizado e evolução. Obrigada Pai, por Sua luz que ilumina meu caminho, Seu amor que me ampara e Sua justiça perfeita que me consola.

Agradeço eternamente a minha família, pelo amor e apoio incondicional. Especialmente à minha avó, meu pai e minha mãe, que são minha referência, meu porto seguro em qualquer situação.

Toda minha gratidão à Professora Karla, por acreditar em mim e me inspirar a aprender e buscar sempre mais. Com certeza contraí uma dívida.

Agradeço também aos Professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Campo Mourão, que participaram de alguma forma da minha graduação. Levarei para toda vida o conhecimento que vocês compartilharam comigo.

Muito Obrigada!

“Na natureza nada se cria, nada
se perde, tudo se transforma”
(LAVOISIER, Antoine Laurent, 1774).

APRESENTAÇÃO

O padrão de consumo dos insumos energéticos tem aumentado ao longo dos anos devido a grande expansão industrial, o crescimento populacional e a melhoria da qualidade de vida das pessoas. Por conseguinte, sendo finitos os recursos naturais, os custos com energia têm sido cada vez mais elevados. De fato a disponibilidade dos recursos energéticos de um país define seu desenvolvimento socioeconômico, tornando imprescindível o uso eficiente e sustentável desses recursos. O vapor é uma das fontes de energia mais utilizadas pela indústria, devido seu alto conteúdo energético, baixo custo e fácil obtenção. No Brasil, o vapor corresponde a 54% da demanda total de energia do setor industrial, representando cerca de 20% do consumo energético nacional. Estudos indicam que é possível conter desperdícios de insumos na ordem de 30% a custo zero, utilizando apenas mudanças operacionais e de comportamento, e ainda reduzir o consumo energético em até 20%. A implementação de um programa de conservação e gerenciamento de energia, que otimize a produção e operação do sistema, racionalizando o consumo energético e utilizando fluxos de desperdício como fonte de energia alternativa, depende do reconhecimento e aplicação dos conceitos básicos de termodinâmica reconhecendo as quantidades e qualidades dos fluxos energéticos e impacto relativo dos parâmetros nos processos. O presente trabalho visa suprir a escassez de manuais práticos para implementação de auditorias energéticas em sistemas de vapor. São revisados os conceitos básicos de engenharia e procedimentos para quantificar a energia (balanço energético) e qualificá-la (balanço exergético). Ainda apresentam-se as etapas imprescindíveis em uma avaliação da eficiência energética (auditoria energética) em uma unidade industrial. Concluindo, o material pode ser utilizado como referência para estudantes e profissionais interessados na racionalização na geração, distribuição e utilização do vapor, fundamentado em conceitos teóricos e estudos de casos práticos concatenados de diversificadas referências.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fases da água.	41
Figura 2. Diagrama para geração de vapor d'água sobre pressão atmosférica	42
Figura 3. Diagrama comparativo dos diferentes tipos de medição de pressão.	48
Figura 4. Diferentes escalas de temperatura.....	49
Figura 5. Curva de saturação do vapor.	50
Figura 6. Relação entre o volume específico e a pressão do vapor.....	51
Figura 7. Sistema de vapor típico.....	59
Figura 8. Balanço de energia em um sistema de vapor típico.....	63
Figura 9. Gerador de vapor aquatubular.	66
Figura 10. Gerador de vapor flamotubular.	67
Figura 11. Gerador de vapor misto.....	68
Figura 12. Acessórios instalados para melhorar o desempenho da caldeira.	68
Figura 13. Relação entre o oxigênio livre e a temperatura da água.	73
Figura 14. Linhas secundárias para distribuição de vapor.	83
Figura 15. Determinação da espessura econômica	85
Figura 16. Alagamento na linha de vapor.....	87
Figura 17. Instalação correta da bota coletora.	89
Figura 18. Dimensionamento das botas coletoras.	90
Figura 19. Layout da tubulação de drenagem de condensado.	90
Figura 20. Conjunto purgador.....	91
Figura 21. Instalação de reduções nas linhas de vapor.	91
Figura 22. Drenagem coletiva.	92
Figura 23. Disposição ideal para drenagem.	93
Figura 24. Perda de vapor por vazamento em purgadores.	98
Figura 25. Diferença entre vapor vivo (a) e vapor flash (b) na descarga do purgador.	99
Figura 26. Separador de umidade.....	100
Figura 27. Pontos de instalação do eliminador de ar.	102
Figura 28. Localização dos pontos de saída de ar.....	102
Figura 29. Taxa de perda de vapor em relação a pressão e o tamanho do vazamento.....	104

Figura 30. Películas que reduzem a eficiência da transferência de calor do vapor.	107
Figura 31. Trocador de calor de injeção direta de vapor.	111
Figura 32. Trocador de calor casco e tubo.	114
Figura 33. Trocador de calor de placas.	114
Figura 34. Trocador de calor tipo vaso encamisado.	115
Figura 35. Operação de um termocompressor.	116
Figura 36. Esquema de instalação do traceamento.	117
Figura 37. Formação de vapor flash.	120
Figura 38. Gráfico para dimensionamento das linhas de retorno.	121
Figura 39. Linhas de retorno alagadas.	122
Figura 40. Esquema de instalação para bombeamento de condensado.	123
Figura 41. Quantidade de vapor flash formado com relação ao condensado.	124
Figura 42. Quantidade aproximada de energia contida no condensado.	125
Figura 43. Tanque flash.	126
Figura 44. Porcentagem de vapor flash formado em relação a queda de pressão.	126
Figura 45. Ferramentas base para gestão energética.	141
Figura 46. Etapas para um diagnóstico energético.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Custo para geração de vapor em relação ao combustível utilizado.	45
Tabela 2. Relação entre a eficiência da combustão, a temperatura dos gases da chaminé e o excesso de ar.....	72
Tabela 3. Influência da umidade no poder calorífico.	77
Tabela 4. Energia necessária (kcal/kg) para gerar um quilograma de vapor saturado.	79
Tabela 5. Eficiência da combustão de combustíveis comuns.	79
Tabela 6. Perda de energia (Watts/ano) em 100 metros de tubulação sem isolamento.	86
Tabela 7. Formação de condensado (kg/h) em 30 metros de tubulação.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

X	Título do vapor []
m	Massa [kg]
P	Pressão [kgf/cm ²]
F	Força [kgf]
A	Área [cm ²]
ρ	Peso específico [kg/m ³]
v	Volume específico [m ³ /kg]
h_f	Calor sensível ou entalpia específica de líquido saturado [kJ/kg]
h_{fg}	Calor latente ou entalpia específica de evaporação [kJ/kg]
h_g	Calor total ou entalpia específica de vapor saturado [kJ/kg]
s_f	Entropia específica de líquido saturado [kJ/kg.K]
s_g	Entropia específica de vapor saturado [kJ/kg.K]
s_{fg}	Entropia específica de evaporação [kJ/kg.K]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/h]
t	Tempo [h]
Q	Calor [kJ]
c	Calor específico [kJ/kg.°C]
ΔT	Variação de temperatura [°C]
ΔS	Variação de entropia do sistema [kJ/kg.K]
Δh	Variação no conteúdo energético [kJ/kg]
C	Concentração [ppm]
η	Eficiência da caldeira [%]

- T Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- θ Qualidade termodinâmica da fonte de energia []
- E_x Conteúdo exergético [kJ]
- E_n Conteúdo energético [kJ]
- T_0 Temperatura ambiente ou estado de referência [$^{\circ}\text{C}$]
- $\Delta \dot{E}_n$ Taxa de variação de energia no volume de controle [kW]
- $\dot{Q}_{v.c.}$ Taxa de calor transferido para o volume de controle [kW]
- $\dot{W}_{v.c.}$ Taxa de trabalho realizado pelo sistema [kW]
- h Entalpia específica na temperatura do fluxo que atravessa a fronteira do volume de controle [kJ/kg]
- s Entropia específica [kJ/kg.K]
- V Velocidade do fluxo que atravessa o volume de controle [m/s]
- g Aceleração da gravidade [m/s^2]
- z Altura [m]
- ef Exergia específica de fluxo [kJ/kg]
- T_j Temperatura na fronteira do volume de controle [$^{\circ}\text{C}$]
- \dot{E}_d Taxa de destruição de exergia [kW]
- \dot{E}_x Taxa de fluxo de exergia [kW]
- h_0 Entalpia específica a temperatura ambiente [kJ/kg]
- s_0 Entropia específica a temperatura ambiente [kJ/kg.K]
- φ Eficiência energética [%]
- ψ Eficiência exergética [%]
- i Taxa de juros [%]
- j Período [ano]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	37
2 VAPOR	40
2.1 GERANDO VAPOR.....	41
2.2 QUALIDADE DO VAPOR.....	43
2.3 ASPECTO ECONÔMICO.....	44
3 CONCEITOS E UNIDADES	47
3.1 PRESSÃO	47
3.2 TEMPERATURA	48
3.3 VOLUME ESPECÍFICO.....	50
3.4 TABELAS DE VAPOR SATURADO.....	51
3.5 VAZÃO	52
3.6 CONDENSAÇÃO	52
3.7 VAPOR FLASH	53
3.8 ENERGIA TÉRMICA	54
3.8.1 Calor Sensível.....	55
3.8.2 Calor Latente.....	56
3.8.3 Calor Total.....	56
3.9 ENTROPIA	57
3.10 PODER CALORÍFICO.....	57
4 SISTEMA DE VAPOR TÍPICO	59
4.1 GERAÇÃO DE VAPOR.....	60
4.2 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR	60
4.3 UTILIZAÇÃO DE VAPOR.....	61
4.4 RETORNO DO CONDENSADO	61
4.5 PERDAS TÉRMICAS	62

5 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA GERAÇÃO DE VAPOR	65
5.1 CALDEIRAS	65
5.2 PERDAS NA CASA DE CALDEIRA	69
5.2.1 Calor nos Gases da Chaminé	69
5.2.2 Excesso de Ar na Combustão	70
5.2.3 Temperatura da Água de Alimentação	72
5.2.4 Pré-aquecedor de Ar	74
5.2.5 Transferências de Calor no Costado da Caldeira.....	74
5.2.6 Calor na Descarga de Superfície	75
5.2.7 Calor na Descarga de Fundo	76
5.2.8 Calor na Combustão de Biomassa Úmida.....	77
5.3 RENDIMENTO DA CALDEIRA	78
5.3.1 Custo da Geração de Vapor.....	78
5.3.2 Eficiência da Caldeira.....	80
6 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR	82
6.1.TUBULAÇÃO	82
6.1.1 Dimensionamento	83
6.2 ISOLAMENTO TÉRMICO	84
6.3 ALAGAMENTO	86
6.4 DRENAGEM DO CONDENSADO.....	87
6.5 PONTOS DE DRENAGEM.....	89
6.6 DRENAGEM COLETIVA.....	92
6.7 PURGADORES.....	93
6.7.1 Métodos de Avaliação de Purgadores.....	97
6.8 SEPARADORES DE UMIDADE.....	100
6.9 PRESENÇA DE AR.....	101

6.10 VAZAMENTOS.....	103
7 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR	105
7.1 REDUÇÃO DE PRESSÃO	105
7.2 CONTROLES DE PROCESSO.....	106
7.3 ÁREAS DE TROCA TÉRMICA.....	107
7.4 ACUMULADOR DE VAPOR	108
7.5 INJEÇÃO DIRETA DE VAPOR	109
7.6 EQUIPAMENTOS DE PROCESSO	111
7.6.1 Secadores	112
7.6.2 Evaporadores	112
7.6.3 Trocadores de Calor.....	113
7.6.4 Termocompressores	115
7.6.5 Traceamento	116
8 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO RETORNO DO CONDENSADO	118
8.1 GERENCIAMENTO DO CONDENSADO RESIDUAL.....	118
8.2 LINHAS DE RETORNO.....	119
8.3 RETORNO ALAGADO E POR GRAVIDADE	122
8.4 BOMBEAMENTO DO CONDENSADO	123
8.5 APROVEITAMENTO DE VAPOR FLASH.....	124
8.6 TANQUES COLETORES E DE ALIMENTAÇÃO	127
9 RENDIMENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE VAPOR.....	128
9.1 QUALIDADE DA ENERGIA TÉRMICA.....	130
9.2 BALANÇOS DE MASSA, ENERGIA E EXERGIA DOS COMPONENTES OU OPERAÇÕES QUE COMPÕEM O SISTEMA.....	132
9.2.1 Balanço de Massa.....	133
9.2.1 Balanço de Energia	133
9.2.3 Balanço de Exergia	135

9.2.4 Avaliação da Eficiência Energética e Exergética.....	137
10 PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA	139
10.1 AUDITORIAS DE ENERGIA	144
10.2 ANÁLISE FINANCEIRA DE PROJETOS	146
10.2.1 Fluxo de Caixa	149
10.2.2 Retorno de Investimento	149
10.2.3 Custo de Capital.....	150
10.2.4 Período de Recuperação do Investimento ou <i>Payback</i>	151
10.2.5 <i>Payback</i> Descontado.....	152
10.2.6 Valor Presente Líquido	152
10.2.7 Taxa Interna de Retorno.....	154
10.2.8 Taxa Mínima de Atratividade.....	154
11 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR	156
11.1 INICIANDO A IMPLEMENTAÇÃO	156
11.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.....	158
11.3 GERENCIANDO A IMPLANTAÇÃO DOS RESULTADOS PLANEJADOS	164
11.4 MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO.....	165
12 CONCLUSÃO	169
REFERÊNCIAS.....	170
ANEXO A – TABELA DE VAPOR SATURADO.....	180
ANEXO B – AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EXERGÉTICA	183
ANEXO C – ANÁLISE FINANCEIRA DE PROJETOS.....	190
ANEXO D – DOCUMENTAÇÃO EXIGIDA PARA UM SISTEMA DE GESTÃO ENERGÉTICA.....	193

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que de 20 a 50% da energia direcionada à produção industrial seja perdida como calor residual nos gases de exaustão, águas de aquecimento, fluidos, superfícies de equipamentos e produtos aquecidos (BCS, 2008). Considerando a necessidade da eficiência energética, a recuperação desse calor residual constitui uma oportunidade atrativa como fonte energética alternativa e de baixo custo implicando na sustentabilidade industrial.

A adoção de medidas que compreendam a diminuição da quantidade de energia primária necessária é imprescindível para a competitividade industrial bem como uso eficiente dos recursos naturais. Mas isso está intrínseco a um programa educativo focado na apresentação das possibilidades para uso eficiente de insumos energéticos visando padrão de produção mais eficaz.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2002), o consumo energético industrial é composto de vapor (34%); combustível (47%) e eletricidade (19%). A Indústria converte cerca de 70% do combustível que adquire em vapor. De todas as formas de energia (incluindo insumos e energia elétrica) compradas pelo setor, 34% são destinados à produção de vapor.

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (2012), ano-base 2011, a indústria representa 36% do consumo da matriz energética nacional. Com relação ao vapor, o Balanço Energético Nacional (2003), com dados de 2002, estimou, que 54% da demanda total de energia na indústria, correspondendo a aproximadamente 20% da demanda total de energia do país, estão associados à geração de vapor.

Vapor é usado como meio de transmissão de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial (RODRIGUES, 2012). É gerado principalmente a partir da água, composto mais abundante da Terra e, portanto de fácil obtenção e baixo custo. Sua temperatura pode ser controlada com precisão através do controle da pressão. Tem alto conteúdo energético por unidade de massa e volume e ao retornar ao estado líquido, cede essa energia ao meio que se deseja aquecer. Pode ser facilmente transportado por tubulações, percorrendo grandes distâncias entre os pontos de geração e utilização (ELETROBRAS, 2005b; BABCOCK & WILCOX,

1985; SPIRAX SARCO, 2004; RODRIGUES, 2012). Assim, tornou-se uma importante fonte de energia para indústria fornecendo inúmeros benefícios na sua utilização, conjugando baixo preço, elevada densidade energética e altas taxas de transferência de calor (ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência do sistema é entendida como a relação entre a quantidade de energia inserida com a quantidade de energia consumida ou útil (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; WANG, 2008). Ela abrange o conjunto de ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perda na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

A eficiência energética de um sistema pode ser obtida através das avaliações energéticas identificando parâmetros termodinâmicos, como quantidade de trabalho realizado e calor transferido. Utilizando a termodinâmica como ferramenta analítica é possível determinar as perdas de energia, contabilizando os fluxos energéticos do sistema e classificando-os quantitativamente e qualitativamente. As avaliações irão auxiliar na determinação dos pontos de desperdício e locais que tenham margem para implementação de melhorias. (ELETROBRAS, 2007; WANG, 2008; ÇENGEL; BOLES, 2007).

Estudos indicam que é possível conseguir uma redução de desperdícios de insumos na ordem de 20 a 30% sem capital de investimento, utilizando apenas mudanças operacionais e de comportamento (FISHER; BLACKMAN; FINNELL, 2007). O custo efetivo do consumo de energia das indústrias pode ser reduzido de 10 a 20% através de um programa bem estruturado de gerenciamento energético que combine tecnologia, controle de práticas operacionais e um plano de conservação de energia (CAPEHART; SPILLER; FRAZIER, 2006).

Um programa de conservação e gerenciamento de energia (PCGE) pode diminuir os custos de produção e operação, através da racionalização do consumo de energia e com a utilização de fluxos de resíduos como fonte de energia alternativa, aumentando a sustentabilidade do processo (WANG, 2008).

A implementação de um programa de medidas gerenciais e operacionais para a melhoria da eficiência energética na geração, distribuição e utilização do vapor pode reduzir as perdas e desperdícios de energia, como demonstra a experiência brasileira e a internacional (ELETROBRAS, 2005a).

Entretanto, a falta de preparo e orientação dos usuários e responsáveis pelos sistemas energéticos leva a um dos atrasos mais relevantes para efetivar ações na direção da racionalização e uso eficiente da energia. É necessário dar condições para a compreensão da concepção, operação e manutenção otimizadas dos sistemas a vapor (ELETROBRAS, 2005a).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um guia de informações técnicas e práticas úteis para melhoria do desempenho energético de um sistema de vapor com a implementação de um programa de conservação e gerenciamento de energia que resulte no uso responsável dos recursos naturais e energéticos, bem como no aumento da competitividade dos setores produtivos e de serviços do país. Com a adoção do programa é possível obter um plano de ação que conjugue eficiência energética, redução de custos e aumento da sustentabilidade.

2 VAPOR

As principais formas de energia utilizadas na indústria são eletricidade, combustíveis e vapor. A eletricidade pode ser aplicada para acionamento mecânico e aquecimento. Os combustíveis fornecem energia através do calor da combustão. A utilização de vapor como fonte de energia incorpora muitos benefícios ao processo. Seguro e de baixo custo, fornece aquecimento rápido e uniforme com controle preciso de pressão e temperatura, além de altos coeficientes de transferência térmica para processos de aquecimento (U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2004; BABCOCK & WILCOX, 1985).

As inúmeras vantagens no uso de vapor o tornam um meio indispensável de transferência de energia. Estas vantagens incluem facilidade de transporte, eficiência, grande capacidade de armazenamento de calor e menor custo em relação a outras fontes de energia. Uma vez que a maior parte do conteúdo energético do vapor é armazenado na forma de calor latente, altas taxas de energia podem ser transferidas eficientemente a uma temperatura constante (U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2004; SPIRAX SARCO, 2011).

Vapor pode ser considerado água em estado gasoso. A água é formada por três átomos, dois de hidrogênio e um de oxigênio e pode ser encontrada no estado líquido, sólido ou gasoso. Quando é adicionado calor a água líquida sua energia interna aumenta, acelerando o movimento das moléculas até ocorrer o rompimento das ligações entre os átomos que a constituem ocorrendo sua vaporização (FERNANDES; PIZZO; MORAES.JUNIOR, 2006).

O estado físico (sólido, líquido, gás) em que a água se encontra depende basicamente das condições de pressão e temperatura. A Figura 1 apresenta o diagrama de fases da água. Alterações na temperatura ou pressão do sistema podem provocar mudanças de fase de sólido para líquido ou vice-versa (fusão/solidificação), de sólido para gás ou vice-versa (sublimação/deposição), de líquido para gás ou vice-versa (vaporização/condensação) (RUSSEL, 2008). No diagrama representado pela Figura 1, as linhas divisórias indicam condições de pressão e temperatura nas quais pode haver transição de estados e, portanto, os dois estados físicos podem coexistir. O **ponto triplo** é a única condição de temperatura e pressão onde as três fases coexistem em equilíbrio. O ponto crítico

corresponde à temperatura máxima onde as fases líquido e vapor podem coexistir em equilíbrio (VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNACKE, 1995).

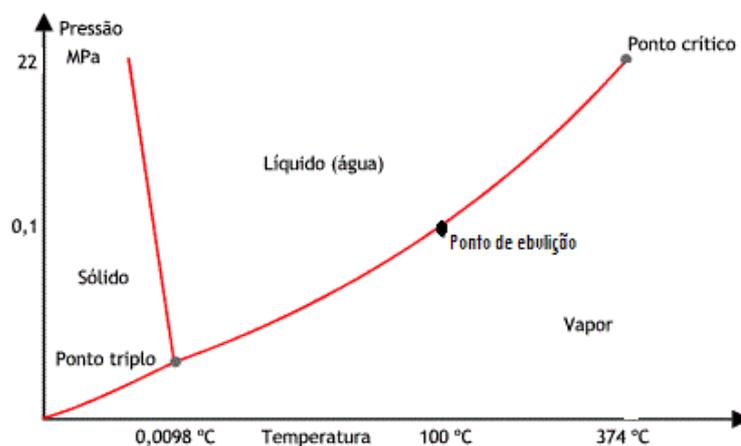


Figura 1. Diagrama de fases da água.

A temperatura de saturação representa a temperatura na qual uma mudança de fase ocorre para uma dada pressão, a pressão de saturação (MORAN; SHAPIRO, 2009). Para água sobre pressão normal (1 atm), a temperatura de saturação é 100°C, e corresponde ao ponto de ebulição da água nestas condições.

2.1 GERANDO VAPOR

Calor deve ser removido ou fornecido a uma substância para que ocorra a mudança de estado físico (INCROPERA et. al., 2008). A geração de vapor pode ser entendida a partir da Figura 2, onde é considerada uma massa de 1 kg de água, sobre pressão atmosférica. Entre os pontos A e B a massa de água se encontra no estado líquido, à medida que calor é fornecido sua energia interna aumenta e a temperatura da água se eleva até atingir a temperatura de saturação – 100°C. Nesse ponto a água se encontra no estado saturado. A partir do ponto B qualquer calor adicional fará com que ocorra a vaporização da água líquida, gerando o vapor saturado. Quanto maior a quantidade de calor absorvido maior será a massa de

água transformada em vapor. A temperatura se mantém constante até que toda massa seja vaporizada, correspondente ao ponto C, onde irá existir apenas vapor saturado seco. Com a adição de mais calor a temperatura do sistema volta a aumentar, aquecendo o vapor existente gerando o vapor superaquecido.

A quantidade de calor necessário para atingir a temperatura de saturação é chamado calor sensível e o calor adicional necessário para que ocorra a mudança de fase é chamado calor latente (INCROPERA et. al., 2008).

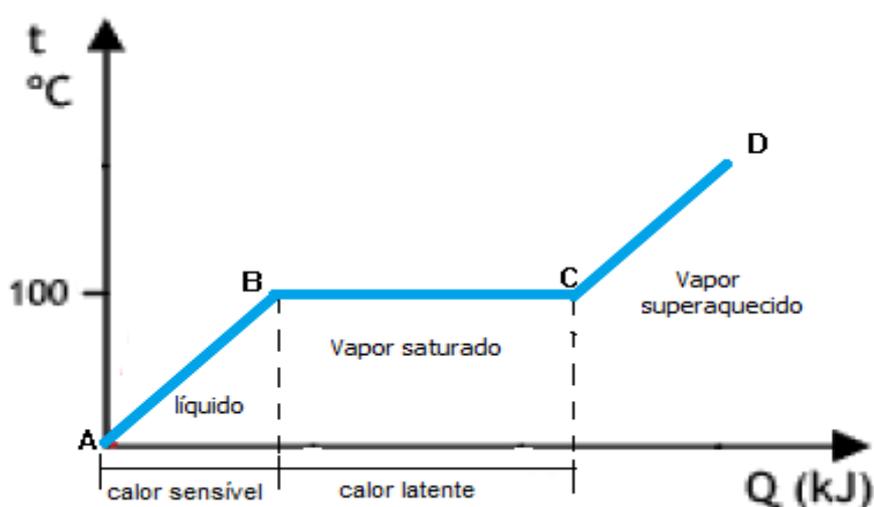


Figura 2. Diagrama para geração de vapor d'água sobre pressão atmosférica

O vapor saturado é aquele que tem uma temperatura definida a uma dada pressão, a temperatura de saturação (RODRIGUES, 2012). Utilizado principalmente para processos de aquecimento, devido seu alto conteúdo de energia térmica (calor latente) liberada durante sua condensação nas trocas de calor. Além disso, possui uma relação linear fixa de pressão e temperatura facilitando o controle para fornecer aquecimento contínuo e uniforme (SPIRAX SARCO, 2011). A geração de vapor saturado seco é difícil na prática, o que ocorre é o arraste de gotículas de água provenientes da caldeira ou da condensação do vapor devido as perdas de calor nas linhas de distribuição. Em processos de aquecimento o desejável é o vapor mais seco possível, ou seja, com maior calor latente.

Entre os principais benefícios na utilização do vapor saturado estão (SPIRAX SARCO, 2005; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000):

- Aquecimento rápido e uniforme através do calor latente;
- Controle preciso de pressão e temperatura;
- Alto coeficiente de transferência térmica;
- Seguro e de baixo custo;
- Reaproveitamento da água condensada.

O vapor superaquecido tem temperatura acima da temperatura de saturação (FERNANDES; PIZZO; MORAES.JUNIOR, 2006). Gerado pelo aquecimento adicional do vapor saturado quando toda massa de água é vaporizada, sendo assim, isento de água. É utilizado principalmente para propulsão e acionamento de turbinas e equipamentos onde a presença de água poderia causar danos (SPIRAX SARCO, 2011).

2.2 QUALIDADE DO VAPOR

O vapor deve estar o mais seco possível para garantir a distribuição efetiva do calor na sua utilização. Como foi dito, a geração de vapor 100% seco é bastante difícil na prática devido as trocas térmica e perdas de carga na tubulação. Como consequência uma parcela do vapor condensa e é arrastado nas linhas de distribuição. Geralmente, uma fração de 0,05 de massa de água é arrastada com o vapor, resultando em um vapor com uma fração seca de 0,95 (RODRIGUES, 2012; SPIRAX SARCO 2011).

Título é a porcentagem de vapor existente em uma mistura de vapor saturado. O título para uma mistura bifásica como água e vapor e pode ser encontrado através da equação (1) (MORAN; SHAPIRO, 2009):

$$X = \frac{m_{vapor}}{m_{líquido} + m_{vapor}} \quad (1)$$

O título varia de 0-1, sendo o líquido saturado com $x=0$ e vapor saturado com $x=1$. É parâmetro da qualidade do vapor, e quanto mais alto seu valor maior será o calor latente.

A fonte de energia térmica dos processos que utilizam vapor é o calor latente devido seu alto conteúdo energético. A água saturada, resíduo da condensação do vapor quando ele cede sua energia, armazena cerca de 25% da energia fornecida na geração e pode ser aproveitada no processo.

Para garantir a qualidade do vapor gerado na sua utilização, ele deve ser produzido (ELETROBRAS, 2005b):

- Na quantidade correta para garantir que haja um fluxo de energia suficiente para as transferências de calor do processo;
- Na temperatura e pressão ideais garantindo o melhor desempenho de operação de cada aplicação,
- Livre de ar e gases condensáveis que poderão interferir na eficiência da transferência de calor;
- Limpo, evitando incrustações e corrosão da tubulação;
- Seco e conseqüentemente com maior conteúdo energético.

2.3 ASPECTO ECONÔMICO

Sistemas de vapor constituem parte importante de quase todos os processos industriais nos dias atuais. Cerca de 37% de todo combustível fóssil queimado nos Estados Unidos são utilizados para gerar vapor (EINSTEIN; WORRELL; KHRUSCCH; 2001).

O vapor armazena grande quantidade de energia que pode ser transportada de modo simples, rápido e eficiente até os pontos de consumo mais remotos. Na maioria dos casos, o uso de vapor tem-se revelado muito mais vantajoso que outros meios de transferência de energia como o gás, água aquecida, eletricidade e óleo (SPIRAX SARCO, 2011).

É importante para avaliação do desempenho do sistema e das oportunidades de conservação de energia a determinação do custo da geração de vapor (R\$/kg vapor). Esse parâmetro é dependente do custo do combustível, da eficiência da caldeira, da temperatura da água de alimentação da caldeira e da pressão do vapor gerado (HARREL, 1996).

A Tabela 1, com dados coletados em agosto de 2004, mostra um comparativo do custo da geração de vapor em relação aos diversos combustíveis que podem ser utilizados. Todos os fatores que interferem significativamente na eficiência do sistema devem ser levados em consideração quando se deseja o custo efetivo do vapor (ELETROBRAS, 2005b)

Tabela 1. Custo para geração de vapor em relação ao combustível utilizado.

Combustível	PCI (kcal/kg)	Custo do combustível (R\$/ton)	Rendimento da caldeira (%)	Produção de vapor (kg/kg _{comb})	Custo do vapor (R\$/ton)
Lenha	2.500-3.300	58,9	60-75	2,7-4,4	13,33-22,00
Óleo Combustível 1A ⁽¹⁾	9.600	1.070,0	80-85	13,7-14,6	73,43-78,02
GLP ⁽²⁾	10.800	2.380,0	80-88	15,4-17,0	140,24-154,26
Gás Natural ⁽³⁾	kcal/m ³	R\$/103m ³	%	kg/m ³	R\$/ton
Condição A	9.400	836,2	80-90	13,4-15,1	55,35-62,27
Condição B	9.400	781,5	80-90	13,4-15,1	51,73-58,20
Condição C	9.400	699,5	80-90	13,4-15,1	46,30-52,09
Energia Elétrica	kcal/kWh	R\$/kWh	%	kg/kWh	R\$/ton
Tarifa Convencional A4	860	0,1505	99	1,5	98,88
Tarifa Convencional A3a	860	0,1433	99	1,5	94,25

Legenda: ⁽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.

Fonte: Eletrobrás (2005b).

Estudos utilizando lenha como combustível, mostram que a combustão direta da lenha é o processo mais simples e econômico para se obter energia (JARA, 1989). Porém, outros fatores que irão influenciar no desempenho econômico do combustível devem ser considerados. Por exemplo, para lenha o custo do armazenamento e sua umidade são fatores importantes (ELETROBRAS, 2005b).

O aproveitamento de resíduos do processo como combustível para caldeira tem sido uma tendência, uma vez que promove a sustentabilidade econômica e ambiental do sistema. A biomassa engloba toda matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados e contêm energia química que pode ser liberada diretamente por combustão (LORA; NOGUEIRA, 2003). Para a utilização da biomassa deve ser considerada sua umidade e massa específica já que esses parâmetros irão influenciar diretamente no seu poder calorífico (RODRIGUES, 2012).

3 CONCEITOS E UNIDADES

A perfeita compreensão de sistemas energéticos depende do domínio de conceitos básicos da engenharia, apresentados a seguir.

3.1 PRESSÃO

É definida como a força exercida por um fluido em uma determinada área (VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995). Pode ser representada pela equação (2). A partir dessa propriedade é possível obter todas as outras propriedades do vapor, sendo então de extrema importância.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

As unidades de pressão mais utilizadas na prática e a relação de igualdade entre elas são apresentadas a seguir (MORAN; SHAPIRO, 2009):

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 14,22 \text{ psi} = 0,98 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$$

Em função da referência podem-se utilizar diferentes medições de pressão (CASSIOLATO, 2010). A Figura 3 apresenta um diagrama comparativo.

A pressão atmosférica é a força exercida pela atmosfera na superfície terrestre. É influenciada pela altitude e ao nível do mar, equivale a aproximadamente 1 bar (CASSIOLATO, 2010).

A pressão absoluta corresponde à soma da pressão manométrica com a pressão atmosférica local (MORAN & SHAPIRO, 2002).

A pressão negativa ou vácuo representa a pressão abaixo da atmosférica devido à altitude ou obtida por um equipamento (bomba de vácuo) (FERNANDES; PIZZO; MORAES JUNIOR, 2006).

A pressão manométrica ou relativa é medida em relação à pressão atmosférica no local. É a diferença entre a pressão absoluta medida em um ponto qualquer e a pressão atmosférica (CASSIOLATO, 2010). Para medi-la, usam-se

instrumentos denominados manômetros e a maioria dos manômetros é calibrada em zero para a pressão atmosférica local. Assim, a leitura do manômetro pode ser positiva (quando indica o valor da pressão acima da pressão atmosférica local) ou negativa (quando se tem vácuo) (FIALHO, 2007).

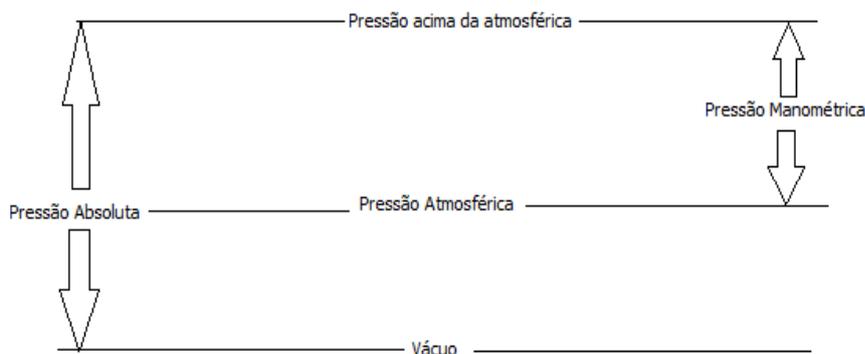


Figura 3. Diagrama comparativo dos diferentes tipos de medição de pressão.

Outra forma de expressar a pressão é em metros de coluna de água (m.c.a.) que permite determinar a influência da altura de uma coluna de água sobre a pressão em uma determinada área. Considerada uma unidade importante, já que o condensado pode retornar com elevação (RODRIGUES, 2012).

Os equipamentos utilizados nos processos industriais possuem limites de pressão que devem ser rigorosamente seguidos para uma operação segura. A Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) é o maior valor de pressão compatível com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais (BRASIL, 1994).

3.2 TEMPERATURA

As moléculas se encontram em contínuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas mais quente se apresenta o corpo e quanto mais lento mais frio. Assim, a temperatura pode ser definida como o grau de agitação das moléculas (RUSSEL, 2008).

Dois corpos possuem igualdade de temperatura se não apresentarem alterações em qualquer propriedade mensurável quando colocados em contato térmico, ou seja, estiverem em equilíbrio térmico (VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995).

Na Figura 4 são apresentadas as escalas de temperatura existentes. Tanto a escala Celsius como a Fahrenheit, são relativas, ou seja, seus valores numéricos, são arbitrários. Existem também, escalas absolutas de temperatura, assim chamadas porque o zero delas é fixado ao zero absoluto de temperatura. As escalas absolutas atualmente em uso são a Escala Kelvin e a Rankine (FIALHO, 2010).

	escalas absolutas		escalas relativas	
	$^{\circ}\text{R}$	K	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
Ponto de ebulição da água	671,67	373,15	100	212
Ponto de fusão do gelo	491,67	273,15	0	32
Zero absoluto	0	0	-273,15	-459,67

Figura 4. Diferentes escalas de temperatura.

Fonte: Fialho (2010).

O vapor saturado possui relação linear entre pressão e temperatura. Esta relação entre a temperatura e a pressão de saturação é chamada de curva de saturação do vapor e pode ser vista na Figura 5. Água e vapor coexistem em qualquer pressão na curva, ambos na temperatura de saturação (SPIRAX SARCO, 2011).

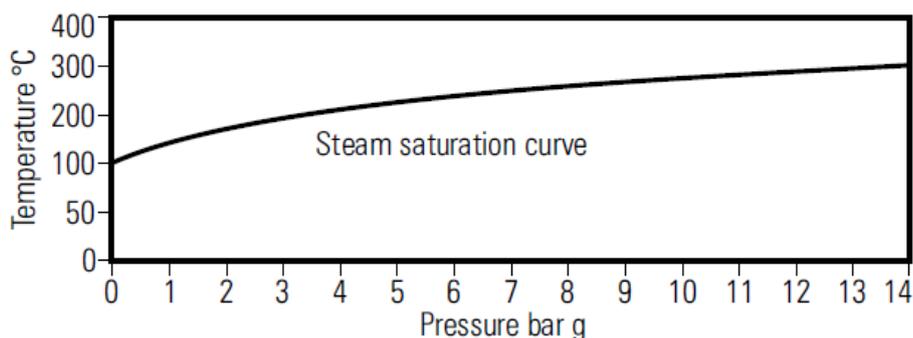


Figura 5. Curva de saturação do vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2011).

Sobre pressão atmosférica (1 atm) a temperatura de saturação da água é 100°C. Porém, a uma pressão superior, aumenta também a temperatura de ebulição e conseqüentemente para atingir esta temperatura será necessária uma quantidade maior de calor sensível.

3.3 VOLUME ESPECÍFICO

O peso específico de um fluido pode ser definido como a massa ocupada por unidade de volume. A unidade no Sistema Internacional (SI) é kg/m^3 (MORAN; SHAPIRO, 2009).

O volume específico é o inverso do peso específico, ou seja, o volume ocupado por um fluido por unidade de massa. A unidade no SI é m^3/kg (MORAN; SHAPIRO, 2009).

O volume específico do vapor varia em função da pressão, esta relação é apresentada na Figura 6, e também pode ser observada nas tabelas de vapor (Anexo A).

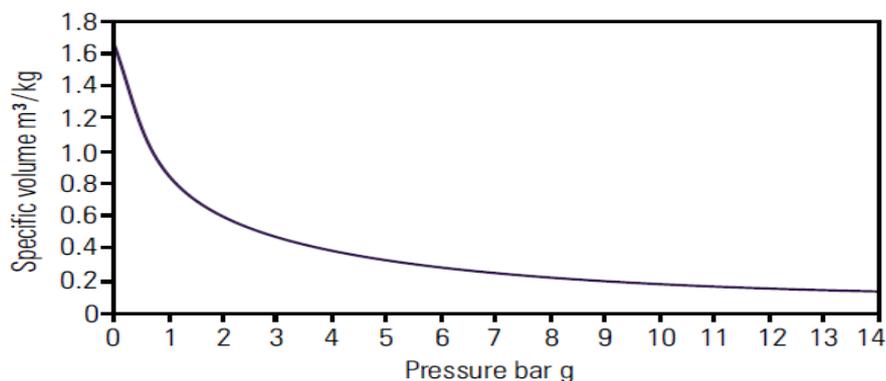


Figura 6. Relação entre o volume específico e a pressão do vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2011).

A geração de vapor a alta pressão resultará em um volume menor ocupado e a distribuição poderá ser feita em tubulações de menor diâmetro. Já nos pontos de utilização é recomendado que se use baixas pressões já que o conteúdo energético do vapor (calor latente) é maior (SPIRAX SARCO, 2005).

A taxa de evaporação é igual à taxa de condensação, ou seja, um quilograma de vapor ao condensar gera um quilograma de água. Porém o volume ocupado pelo vapor será maior do o ocupado pela água. Isso deve ser considerado no dimensionamento das linhas de retorno de condensado que contarão com uma porção de vapor reevaporado (SPIRAX SARCO, 2000).

3.4 TABELAS DE VAPOR SATURADO

As tabelas de vapor saturado são resultantes de dados experimentais. Existem duas tabelas disponíveis, uma relacionando as propriedades do vapor com sua temperatura de saturação e outra com sua pressão de saturação. As propriedades físicas e termodinâmicas descritas nessas tabelas são: volume específico (v), calor sensível ou entalpia específica de líquido saturado (h_f), calor latente ou entalpia específica de evaporação (h_{fg}), calor total ou entalpia específica de vapor saturado (h_g), além da entropia específica de líquido saturado (s_f), de vapor saturado (s_g) e de evaporação (s_{fg}). As tabelas podem ser vistas no Anexo A.

3.5 VAZÃO

Vazão mássica pode ser definida como a quantidade mássica de um fluido que escoar através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. As unidades mais utilizadas de vazão mássica são: kg/s, kg/h, t/h (CASSIOLATO; ORELLANA, 2010). Pode ser representada através da equação (3).

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{fluido}}}{t} \quad (3)$$

Todo sistema de vapor é dimensionado considerando a necessidade de vazão de cada equipamento. A caldeira deve ter capacidade de vazão para atender todos os equipamentos do sistema. Além disso, na partida do sistema a necessidade de vazão é muito maior do que quando comparada com a operação em regime normal. Isso ocorre porque na partida as tubulações e equipamentos têm suas superfícies frias e com o contato o vapor cede calor aumentando as taxas de condensação (RODRIGUES, 2012).

3.6 CONDENSAÇÃO

Ao contrário da evaporação, durante o processo de condensação o vapor perde energia, e ao condensar torna-se líquido. A mudança de fase ocorre durante as trocas térmicas, onde o vapor cede energia para o sistema.

O processo de condensação do vapor pode ser entendido através da Figura 2. Quando vapor se encontra no ponto C, com a remoção de calor devido às trocas térmicas ele retorna ao ponto B no estado de líquido saturado.

A taxa de evaporação é igual à taxa de condensação, porém a quantidade de calor latente liberado durante a mudança de fase é de 2 a 5 vezes maior que a quantidade de calor sensível na água quente saturada residual após a condensação (SPIRAX SARCO, 2006).

Cerca de 75% da energia fornecida pela caldeira para produzir vapor é transferida na troca de calor, os 25% restantes ficam retidos no condensado. Esse calor pode ser aproveitado no processo. Além disso, o condensado é água destilada, tratada, sendo ideal para uso em caldeira. Assim, é muito importante um sistema eficiente de recuperação de condensado. Desperdiçá-lo é prejuízo financeiro e ecológico (SPIRAX SARCO, 2012b).

A condensação provoca uma queda na pressão do sistema devido à redução do volume específico. Regimes altos de condensação na distribuição do vapor podem provocar acentuada queda de pressão e conseqüentemente queda de temperatura, reduzindo a eficiência do processo (RODRIGUES, 2012).

3.7 VAPOR FLASH

O vapor reevaporado, também chamado de vapor flash, forma-se pela diminuição da pressão nas descargas de condensado. Se o conteúdo energético do condensado for maior do que o da água saturada à pressão atmosférica, então parte do condensado descarregado será convertido em vapor para o reestabelecimento do equilíbrio energético (TRABANCHINI, 2012).

A água condensada se forma à pressão de operação do sistema e na temperatura do vapor saturado nessa pressão. Na descarga a água condensada está na pressão atmosférica que é menor que essa pressão. Porém, sobre pressão atmosférica não pode existir água líquida na temperatura de saturação do sistema e uma parte do condensado se vaporiza formando o vapor flash. A porcentagem de reevaporação do vapor pode ser encontrado através da equação (4) (SPIRAX SARCO, 2004).

$$\% \text{ Reevaporação} = \frac{h_f(\text{alta pressão}) + h_f(\text{baixa pressão})}{h_{fg}(\text{baixa pressão})} \quad (4)$$

Caso vapor seja gerado a 10 kgf/cm² e descarregado a 2 kgf/cm² tem-se a cada 1000 kg/h de condensado, 100,8 kg/h de vapor. Assim, o aproveitamento do vapor flash contribui para alcançar maior eficiência do sistema. Cada quilo de vapor

reevaporado utilizado será um quilo que poderá deixar de ser gerado pela caldeira (SPIRAX SARCO, 2012b).

Equipamentos que operam a alta pressão devem ser checados, já que quanto maior a pressão de operação maior será a quantidade de vapor flash. Este vapor pode ser utilizado para processos de pré-aquecimento ou suprir cargas de baixa pressão (U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000).

3.8 ENERGIA TÉRMICA

A energia contida em um sistema pode ser descrita como sua capacidade de realizar trabalho. A transferência de energia por meio de movimentação mecânica é chamada de trabalho (VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995). O físico inglês James Prescott Joule descobriu em experimentos que a energia necessária para aumentar a temperatura de uma determinada massa de água é a mesma, independentemente se a fonte de energia for calor ou trabalho, provando uma relação de equivalência entre o trabalho mecânico e o calor (Millar, et. al.; 1996).

A energia térmica corresponde a energia associada ao calor cedido quando há diferença de temperatura entre dois sistemas. Quando ocorrem transferências de calor a energia térmica transita entre as fronteiras dos sistemas (Incropera, et. al., 2008). A transferência ocorre no sentido decrescente de temperatura como resultado do diferencial de temperatura entre os meios, ou seja, do corpo mais quente para o mais frio (MORAN; SHAPIRO, 2009; VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995).

A entalpia é uma propriedade que mede o conteúdo calorífico de um elemento. É o termo utilizado para designar a energia térmica total de um fluido (como água e vapor), dentro de condições de pressão e temperatura pré-estabelecidos. A unidade mais utilizada é o Joule (J). A entalpia específica é a medida da energia térmica total por unidade de massa de uma substância, a unidade no SI é kJ/kg (SPIRAX SARCO, 2011). Outras unidades utilizadas e equivalentes são:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J} \text{ ou } 1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

O calor específico ou capacidade térmica de uma substância relaciona a variação de temperatura com a quantidade de calor adicionado ou removido (MORAN; SHAPIRO, 2009). É definido como a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura em 1 °C de 1 kg da substância. O calor específico da água é 4,18 kJ/kg °C ou 1 kcal/kg °C. Quando comparado com outros fluidos é um valor alto, por isso vapor e água são considerados fontes de energia de alto conteúdo energético (SPIRAX SARCO, 2005). Porém, quanto maior o calor específico da substância, maior será a energia necessária para variar sua temperatura.

O calor necessário para elevar a temperatura de uma substância pode ser determinado pela equação (5).

$$Q = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

A quantidade de calor necessário para aquecer 1 kg de água de 0 °C até a temperatura de saturação de 100 °C. Sobre pressão atmosférica (1 atm) é 418 kJ. Esse valor também pode ser obtido através das tabelas de vapor saturado utilizando as mesmas condições.

3.8.1 Calor Sensível

Corresponde a energia contida na água no estado líquido. Também chamado de entalpia específica de líquido saturado. O calor sensível é a energia fornecida ou retirada de um fluido para que ocorra alteração na temperatura, sem mudança de fase (MORAN; SHAPIRO, 2009; INCROPERA et. al.; 2008).

3.8.2 Calor Latente

Pode ser designado também pelo termo entalpia de evaporação. É a quantidade de energia fornecida ou retirada para que ocorra mudança de fase. Sem que haja mudança de temperatura (SPIRAX SARCO, 2011).

O calor latente real, ou seja, disponível para transferência de calor nos processos de aquecimento é dada pela fração seca (título do vapor) e pode ser obtida com a equação (6). A entalpia específica de evaporação pode ser obtida através das tabelas de vapor saturado. Lembrando que quanto maior a fração seca do vapor, maior o conteúdo energético.

$$h_{fg (real)} = h_{fg} \cdot X \quad (6)$$

3.8.3 Calor Total

Corresponde a energia total contida no vapor saturado. É a soma do calor latente fornecido para vaporização com o calor sensível necessário para elevar a temperatura da água até a temperatura de saturação. Na prática, para vaporizar 1 kg de água é necessário o calor total sobre uma pressão preestabelecida menos o calor sensível contido na água de alimentação à temperatura de alimentação, como mostra a equação (7) (RODRIGUES, 2012).

$$Q_{vaporização} = h_g - h_f (\text{água de alimentação}) \quad (7)$$

A equação (7) mostra que quanto maior for a temperatura de alimentação da caldeira, menor será o calor necessário para gerar vapor.

3.9 ENTROPIA

A entropia é considerada uma medida da desordem de um sistema ou, o grau de afastamento em que ele se encontra da idealidade. Ao contrário da massa e a energia que se conservam, a entropia é gerada no sistema sempre que estão presentes condições não ideais, também chamadas de irreversibilidades, como atrito. No sistema internacional (SI) entropia é expressa em kJ/kg.K. (MORAN; SHAPIRO, 2009; VAN WYLEN; SOONTAG; BORGNAKKE, 1995).

A variação de entropia em um sistema pode ser descrita pela equação (8). Esta variação é causada por mudanças do seu conteúdo energético, ou seja, sempre que o sistema cede ou recebe energia.

$$\Delta S = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (8)$$

3.10 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico (PC) é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa de um combustível (JARA, 1989). Segundo Briane & Doat (1985) no Sistema Internacional o poder calorífico é expresso kJ/kg, mas pode ser expresso em kcal/kg.

A combustão é uma reação de oxidação, com liberação de calor, entre um combustível e o oxigênio (comburente). A equação (9) mostra de forma genérica o processo (TROVATI, 2012):



O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O superior (PCS) inclui a energia que a umidade absorve ao evaporar e, é parâmetro para determinar a energia máxima que se pode obter na queima de um combustível (BRIANE; DOAT, 1985).

O poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). Representa o calor disponível para combustão (RODRIGUES, 2012).

O teor de umidade e a massa específica são os parâmetros que mais influenciam no poder calorífico de um combustível. Quanto maior for o teor de umidade menor será o poder de combustão devido o processo de evaporação da água que consome energia. A massa específica irá influenciar no volume de combustível a ser queimado para alcançar determinada quantidade de energia (ELETROBRAS, 2005a).

Para escolha do combustível a ser utilizado para geração de vapor é necessário um estudo prévio quanto sua aplicação, o tipo de caldeira, sua disponibilidade e o custo fixo e operacional. Além disso, o impacto ambiental provocado também deve ser considerado, uma vez que tudo isso implicará na maior sustentabilidade e eficiência do sistema (TROVATI, 2012).

4 SISTEMA DE VAPOR TÍPICO

Devido sua capacidade de armazenar grande quantidade de energia, o vapor é bastante utilizado como meio de transmissão de energia de um ponto central, onde é gerado, a casa da caldeira, até os pontos de uso (SPIRAX SARCO, 2011).

Um sistema de vapor típico pode ser representado pela Figura 7. Constituído por quatro componentes principais: gerador de vapor (caldeira), sistema de distribuição, equipamentos de consumo (pontos de uso) e o retorno do condensado (SPIRAX SARCO, 2011; PALACIOS, 2010; RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b). Todos os elementos do sistema interagem entre si, portanto se houver qualquer problema no funcionamento em alguma das partes todo sistema fica comprometido o que poderá acarretar perdas energéticas e consequente aumento do custo de operação (PALACIOS, 2010).

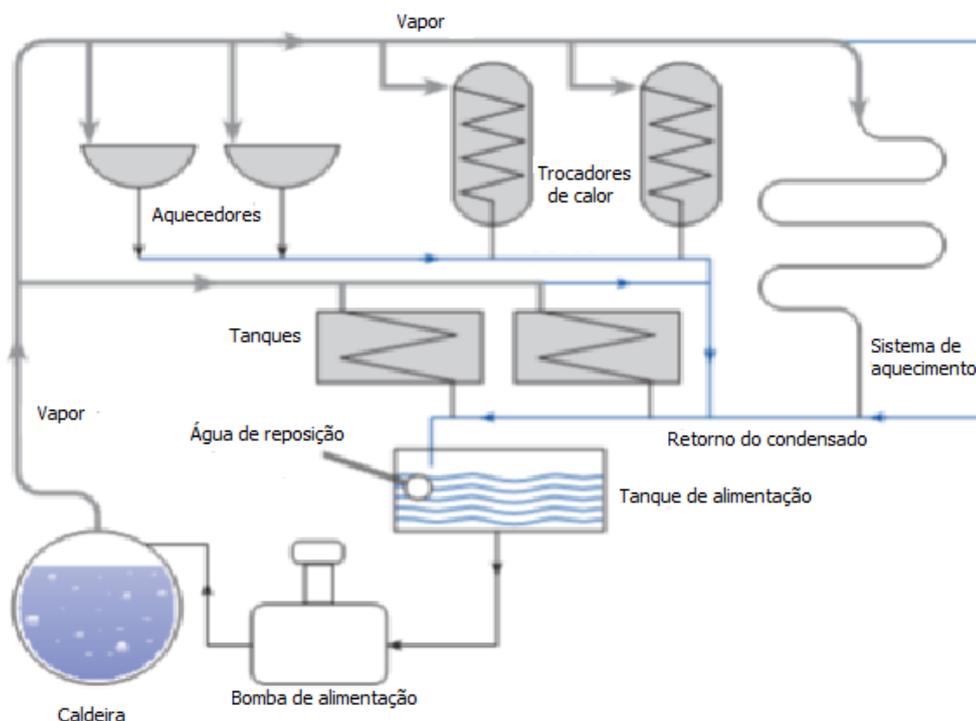


Figura 7. Sistema de vapor típico.

Fonte: Palacios (2010).

O vapor gerado pela caldeira é transportado por tubulações até os pontos de uso onde ele irá ceder calor para o processo e condensar. Para economia de energia e insumos, a água condensada é purgada para posterior reutilização na caldeira.

O entendimento do funcionamento de um sistema de vapor genérico é importante para caracterização de um sistema específico e identificação de possíveis pontos de melhoria de desempenho.

4.1 GERAÇÃO DE VAPOR

A casa da caldeira constitui o ponto de partida do sistema de vapor, abrangendo desde a entrada da água líquida até a saída de vapor para distribuição. As caldeiras são equipamentos destinados a gerar vapor através da transferência de energia proveniente da combustão de um determinado combustível para uma massa de água até sua mudança de fase (PALACIOS, 2010; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; TROVATI, 2012). Parte da energia utilizada na geração do vapor pode ser proveniente da recuperação de calor residual do processo aumentando a sustentabilidade e eficiência do sistema.

O efeito da alta pressão na geração faz o vapor fluir da caldeira para o sistema de distribuição que compreende as válvulas, acessórios e tubulações que ligam o ponto de geração aos pontos de consumo.

4.2 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

Para conduzir o vapor da caldeira até os pontos de uso são utilizados sistemas de tubulações mais ou menos complexos, de acordo com a distância, posição e características dos equipamentos consumidores do processo.

Para que o vapor chegue ao destino na quantidade correta e a temperatura e pressão requeridas deve-se ter cuidado especial com o projeto das linhas de

distribuição de vapor. Entre os principais fatores que podem interferir na eficiência da distribuição estão o dimensionamento correto, a drenagem de condensado nos pontos de acúmulo e o isolamento térmico das tubulações, válvulas e acessórios (RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010; ELETROBRAS, 2005b).

4.3 UTILIZAÇÃO DE VAPOR

O vapor saturado é um fluido extremamente flexível e por isso é utilizado para os mais diversos fins: aquecimento, esterilização, limpeza, entre outros (ELETROBRAS, 2005b; SPIRAX SARCO, 2011). Os trocadores de calor, evaporadores, serpentinas e sistemas de traceamento estão entre os consumidores de vapor mais utilizados na indústria para processos de aquecimento. Ao entrar em contato com superfícies de menor temperatura o vapor cede calor latente e volta ao estado líquido (U. S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000; PALACIOS, 2010). O condensado é um resíduo que pode ser aproveitado em outros processos já que é água destilada e armazena o calor sensível.

Na indústria de alimentos, principalmente em processos de cozimento, o vapor pode ser utilizado de forma direta, ou seja, sem separação por uma superfície. Neste caso, o vapor entra em contato com o produto e cede todo seu calor, latente e sensível, e o condensado torna-se parte integrante do produto (SPIRAX SARCO, 2011; PALACIOS, 2010).

Para a operação eficiente do sistema é importante que o vapor chegue ao seu destino em condições ideais. Um estudo deve ser realizado para determinar os parâmetros de operação do processo visando à otimização das condições de operação.

4.4 RETORNO DO CONDENSADO

Para alcançar a eficiência máxima em um sistema de vapor é essencial que o condensado gerado seja removido no momento da sua formação para garantir o

desempenho das transferências de calor e para posteriormente ser utilizado no processo ou acumulado para o retorno a caldeira. Depois de purgado o condensado é descarregado da alta pressão do circuito para pressão atmosférica, com essa mudança parte do condensado reevapora gerando o vapor flash que pode suprir cargas de baixa pressão no processo (SPIRAX SARCO, 2005; PALACIOS, 2010).

4.5 PERDAS TÉRMICAS

O consumo de energia é um processo de conversão (WANG, 2008). Na geração de vapor, por exemplo, a energia química resultante da reação de combustão do combustível é convertida na energia térmica do vapor. Durante as etapas de conversão parte da energia é perdida. Além disso, nos sistemas de vapor as perdas podem ocorrer durante os processos de transferência de calor devido a incrustações na tubulação, isolamento térmico ineficiente, vazamentos, entre outros. O Quadro 1 apresenta as oportunidades mais comuns identificadas para o aumento da eficiência energética em sistemas de vapor (BARRIGA, 2012; RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b; WANG, 2008).

A eficiência do sistema é entendida como a relação entre a quantidade de energia inserida com a quantidade de energia consumida ou útil (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; WANG, 2008). Para determinar o desempenho do sistema e identificar os locais das possíveis perdas é essencial o conhecimento dos fluxos principais de consumo de energia. Um balanço energético típico de um sistema de vapor é apresentado na Figura 8. Este exemplo mostra que 25 a 44% da energia inserida é perdida. Isso mostra o grande potencial de melhoria no desempenho do sistema, mesmo sem considerar as oportunidades de redução de consumo com a otimização de processos e equipamentos de uso final de vapor (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005).

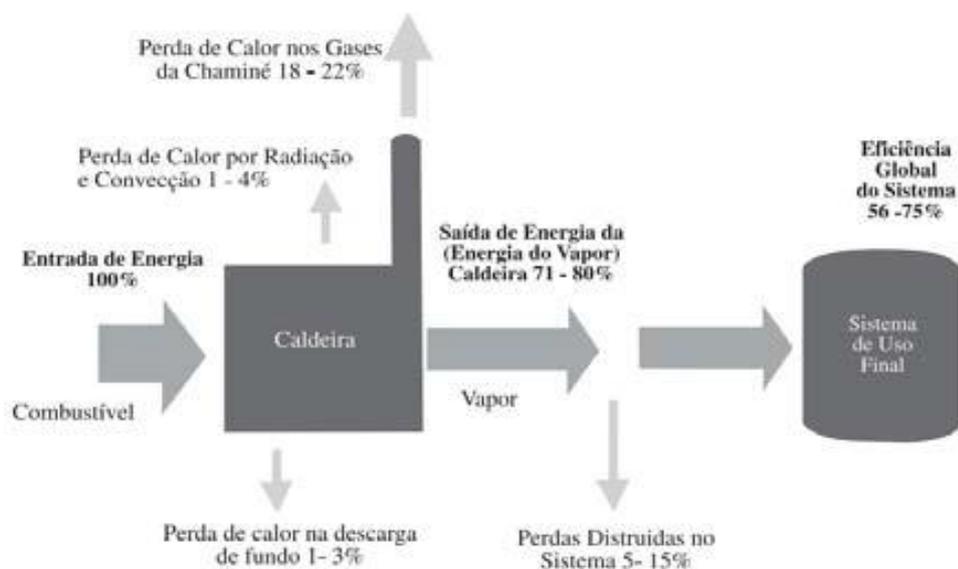


Figura 8. Balanço de energia em um sistema de vapor típico.

Fonte: Eletrobras (2005b).

Geração de Vapor	
Área de melhoria	Medidas para reduzir perdas
Eficiência da caldeira	-Medições frequentes dos gases; -Verificação do excesso de ar.
Economizador	-Instalar para aquecimento da água de alimentação;
Isolamento térmico	-Manutenção e isolamento tubulação da água de alimentação da caldeira; -Manutenção e isolamento do costado da caldeira.
Incrustações	-Limpeza e inspeção das áreas de transferência de calor.
Água de alimentação	-Tratamento eficiente para eliminar gases e sólidos dissolvidos e sólidos suspensos; -Manter temperatura constante.
Descargas	-Evitar descargas excessivas.
Distribuição de Vapor	
Condensado	-Drenagem eficiente nos pontos de acúmulo; -Instalação e manutenção de purgadores, separadores de umidade e botas coletoras.
Isolamento térmico	-Manutenção e isolamento da tubulação.
Ar	-Verificar presença em pontos altos e finais de linha para eliminação; -Aplicação de elementos termostáticos para eliminação.
Vazamentos	-Verificação frequente e reparo.

Área de melhoria	Medidas para reduzir perdas
	Utilização de Vapor
Pressão de operação	-Redução da pressão no ponto de consumo.
Áreas de troca térmica	-Limpeza e manutenção.
Isolamento térmico	-Manutenção e isolamento de partes aquecidas.
Eficiência consumidores	-Verificação do desempenho dos equipamentos.
	Retorno do Condensado
Vapor flash	-Verificação do aproveitamento; -Considerar sua formação no dimensionamento da tubulação.
Retorno do condensado	-Verificação dos pontos onde o condensado não é recolhido; -Possibilidade de retorno por gravidade; -Verificação da viabilidade do bombeamento.
Isolamento térmico	-Isolamento do tanque de condensado; -Isolamento da tubulação.

Quadro 1. Oportunidades de conservação de energia típicas em um sistema de vapor.

5 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA GERAÇÃO DE VAPOR

A casa da caldeira é o ponto de partida no uso de vapor como fonte de energia e por isso a melhoria na eficiência dessa parte do sistema deve ser priorizada. Além disso, seu desempenho irá determinar os aspectos econômicos e técnicos, como o custo do vapor e a quantidade e qualidade de vapor disponível para uso.

5.1 CALDEIRAS

As caldeiras podem ser definidas como um trocador de calor complexo que produz vapor de água a alta pressão a partir da energia liberada por um combustível na presença de um comburente, geralmente o ar, e pode ainda incorporar outros componentes para o aumento da eficiência (RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009).

Nos processos industriais, a caldeira é um equipamento de alto custo e que exige responsabilidade técnica na operação. O projeto, operação e manutenção são padronizados e fiscalizados por uma série de normas, códigos e legislações encontrados na NR-13 sendo o Ministério do Trabalho responsável pela sua aplicação (BRASIL, 1994).

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com a sua operação e atualmente são três os tipos encontrados (SPIRAX SARCO, 2005; TROVATI, 2012; BIZZO, 2012; MARTINELLI JUNIOR, 1998):

- Caldeiras Aquatubulares: onde os gases circulam por fora dos tubos, e a vaporização da água se dá dentro dos mesmos;
- Caldeiras Flamotubulares: onde os gases de combustão circulam por dentro de tubos, vaporizando a água que fica por fora dos mesmos;
- Caldeiras Mistas: são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água.

As caldeiras aquatubulares apresentam maior capacidade de produção e maior pressão de operação (SPIRAX SARCO, 2000; TROVATI, 2012). A Figura 9 apresenta um sistema de geração de vapor aquatubular. A maior parcela da energia é absorvida nas superfícies expostas diretamente às chamas na câmara de combustão, onde predomina a troca de calor por radiação. Em caldeiras bem dimensionadas, as paredes d'água representam menos de 10% da superfície de troca de calor total e são capazes de absorver até 50% da energia liberada na combustão. Nas partes posteriores da caldeira, os gases fornecem calor por convecção e radiação gasosa (MARTINELLI JUNIOR, 1998).

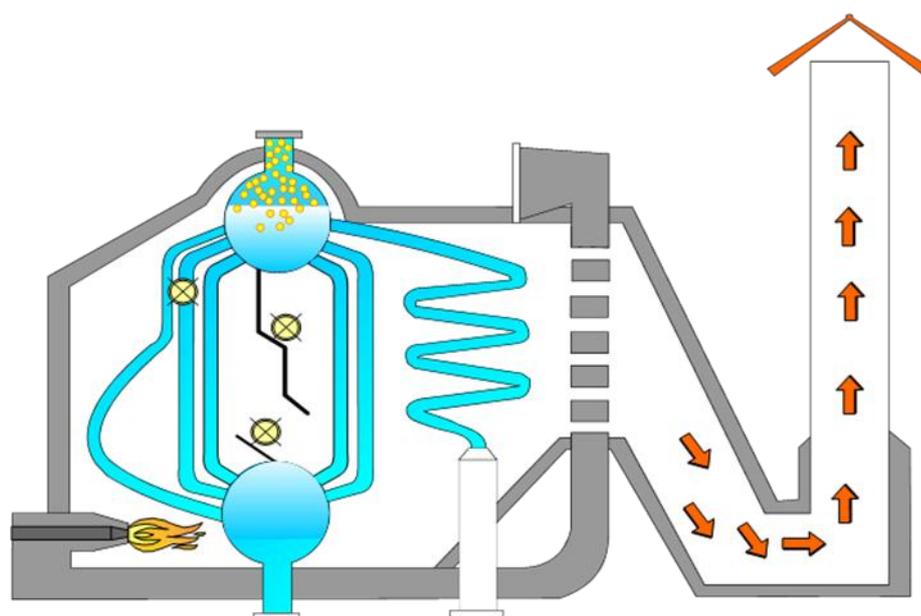


Figura 9. Gerador de vapor aquatubular.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

Nas caldeiras flamotubulares o vapor é gerado de forma direta e simples, no entanto, não propiciam vapor a pressão muito elevada (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009). São equipamentos derivados das caldeiras antigas, onde o fogo e os gases quentes da combustão circulam no interior dos tubos e a água a ser vaporizada circula pelo lado de fora (MARTINELLI JUNIOR, 1998). A eficiência térmica destas caldeiras está na faixa de 80 a 90%, sendo difícil atingir maiores valores pela dificuldade de se acrescentar equipamentos adicionais de recuperação

de calor (BIZZO, 2012). Um esquema desses geradores é apresentado na Figura 10.

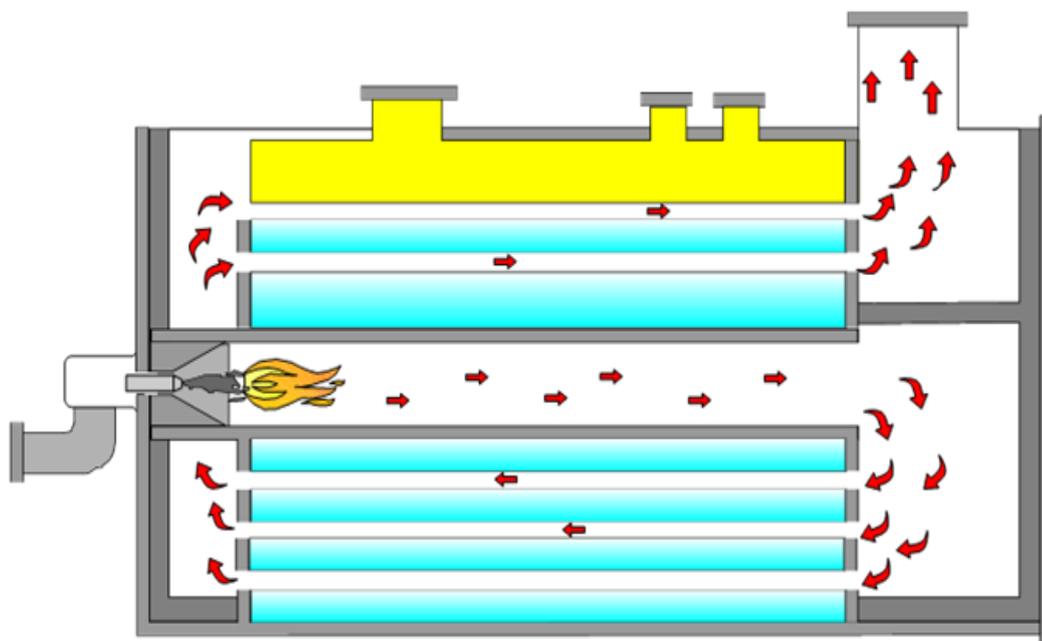


Figura 10. Gerador de vapor flamotubular.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

As caldeiras mistas surgiram da necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade. Apresentam-se como uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Porém, tem eficiência inferior aos outros dois geradores citados (BIZZO, 2012). A Figura 11 apresenta um esquema típico das caldeiras mistas.

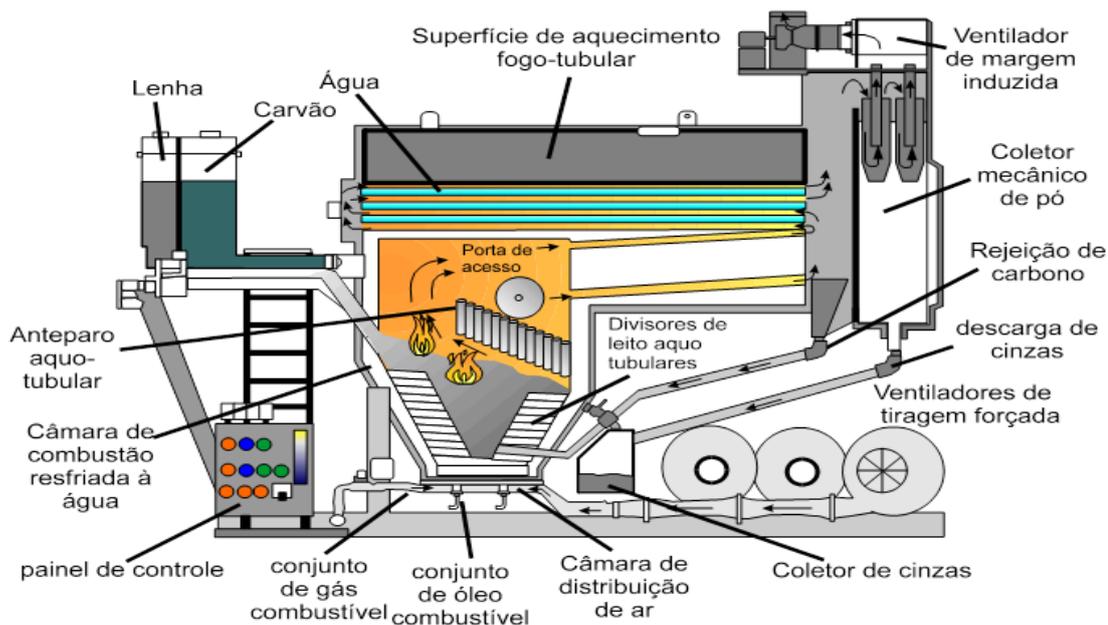


Figura 11. Gerador de vapor misto.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

Em caldeiras grandes podem ser instalados outros componentes com o objetivo de aumentar a eficiência e melhorar o desempenho de operação (TROVATI, 2012). Os elementos típicos instalados para essa finalidade são mostrados na Figura 12.

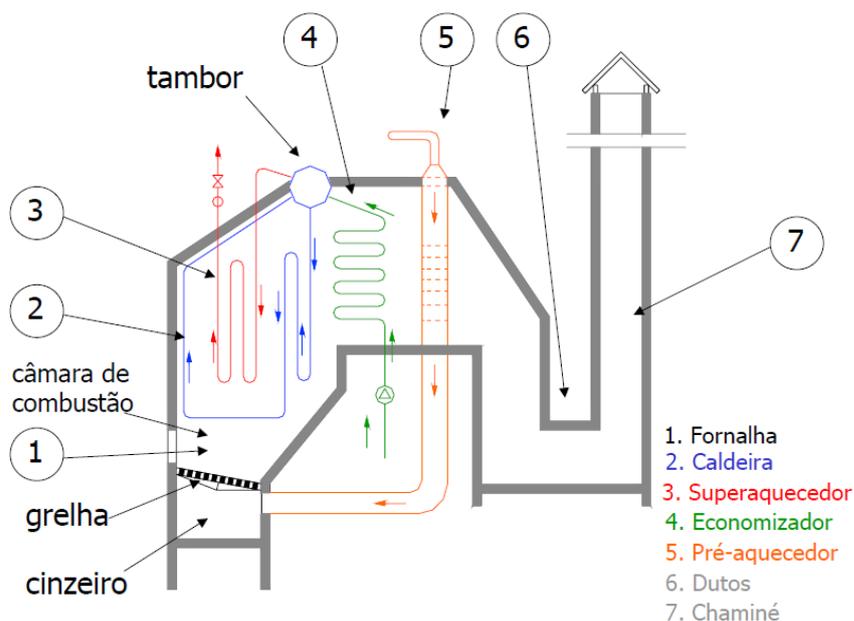


Figura 12. Acessórios instalados para melhorar o desempenho da caldeira.

O pré-aquecedor é instalado com o objetivo de aquecer o ar comburente para alcançar um melhor desempenho na transferência de calor por radiação. Com isto, é possível reduzir o consumo de combustível. O aquecimento pode ser feito com o aproveitamento do calor residual dos gases de combustão.

Outro equipamento que pode ajudar na redução do consumo de combustível é o economizador. Considerado um trocador de calor que pré-aquece a água de alimentação e também pode utilizar como fonte de calor gases residuais. Além de melhorar o rendimento da unidade, sua instalação minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a já existente no tanque (MARTINELLI JUNIOR, 1998; BIZZO, 2012; TROVATI, 2012).

5.2 PERDAS NA CASA DE CALDEIRA

5.2.1 Calor nos Gases da Chaminé

Os gases da chaminé geralmente estão entre as fontes de maior perda de calor no sistema de vapor. Apenas com um controle rigoroso é possível reduzir esse desperdício de energia e diminuir os custos de produção. As perdas podem ser verificadas através da temperatura em que os gases deixam a caldeira. Altas temperaturas indicam baixa eficiência da operação da caldeira (SPIRAX SARCO, 2011).

O melhor desempenho da caldeira é alcançado quando ocorre a troca de calor eficiente dos gases resultantes da combustão com o vapor. Os principais fatores que podem influenciar no desempenho são (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS; 2005b):

- Produção de vapor: A carga da caldeira afeta diretamente a temperatura dos gases. Quando a carga aumenta a temperatura dos gases aumenta. Porém a operação com uma carga baixa aumenta as perdas por radiação pelo costado e aumenta o excesso de ar o que também vai ocasionar desperdícios. Pouco se pode fazer com relação a esse a esse fator, o mais importante é o monitoramento da

temperatura em função da carga para que se estabeleça um parâmetro de comparação;

- Sujeiras nas áreas de transferência de calor: As incrustações que impedem as trocas térmicas podem estar presentes tanto no lado da água quanto no lado da combustão. As superfícies devem ser limpas periodicamente para manter elevadas as taxas de transferência e impedir desperdícios. No lado da combustão a fuligem pode acumular agindo como isolante térmico. No lado da água os principais responsáveis pela barreira na troca de calor são os sólidos presentes na água de alimentação como o cálcio, magnésio e sílica que formam uma película nos tubos trocadores de calor da caldeira acarretando grandes perdas. Além disso, sem um tratamento eficiente da água captada pode ocorrer corrosão nas superfícies metálicas aumentando assim, os custos de operação e manutenção. Por isso o tratamento da água é de extrema importância para manter o bom rendimento e garantir menores custos na geração de vapor.

A redução de 22 °C na temperatura dos gases da chaminé pode acarretar um aumento de 1% na eficiência da caldeira (RODRIGUES, 2012). Assim, torna-se indispensável o monitoramento desse parâmetro, assim como inspeções na eficiência do tratamento da água e na limpeza periódica das superfícies de troca térmica.

5.2.2 Excesso de Ar na Combustão

Reações de combustão são reações químicas que envolvem a oxidação completa de um combustível com liberação de energia. Para que ocorra essa reação é necessário ar, porém para assegurar que todo combustível se oxide, uma quantidade de excesso de ar deve ser acrescentado. A maioria dos processos indústrias utiliza o ar ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio para a combustão (BIZZO, 2012).

A eficiência da combustão fornece uma medida da transformação da energia química contida no combustível em energia térmica disponível para transferência de calor. O excesso de ar é fator determinante na eficiência da combustão, pois controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos da combustão (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010).

Um grande excesso de ar é indesejável, por que diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, resultando em uma perda de desempenho da utilização do calor do combustível, além de diminuir o comprimento da chama. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na formação de monóxido de carbono, além de gerar fuligem e fumaça, bem como possibilitar o acúmulo de combustível não queimado, causando risco de explosão (BIZZO, 2012; DALL'ORTO, 2012; CERON, 2010; CIBO, 1997).

A medida de equilíbrio do excesso de ar é baixo o suficiente para não diminuir a eficiência global da transferência de energia do combustível para o vapor, e alta o suficiente para combustão completa do combustível. A análise da temperatura e da concentração de oxigênio e monóxido de carbono dos gases da chaminé determina o valor ótimo do excesso de ar. Um desequilíbrio na prática pode ser reconhecido pelo aparecimento de quantidade excessiva de monóxido de carbono (CO) no gás de combustão, e produção da fumaça preta (fuligem) ou presença de grande quantidade de oxigênio (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010; CIBO, 1997).

Uma relação entre o excesso de ar com a temperatura dos gases da chaminé e a eficiência da combustão é mostrada na Tabela 2. A eficiência da caldeira pode ser aumentada em 1% a cada 15% na redução de excesso de ar (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS; 2005).

Tabela 2. Relação entre a eficiência da combustão, a temperatura dos gases da chaminé e o excesso de ar.

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

Fonte: Eletrobrás (2005b).

Além do melhor desempenho econômico, operar com níveis de excesso de ar ideais asseguram o cumprimento das normas ambientais. O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto no nível de emissão de poluentes (Co_x , So_x , No_x) (PINHEIRO; VALLE, 1995; CERON, 2010).

5.2.3 Temperatura da Água de Alimentação

A temperatura da água de alimentação irá influenciar de forma direta no desempenho da caldeira. Como foi dito, para vaporizar a água é preciso antes que ela atinja a temperatura de saturação, para isso certa quantidade de calor deve ser cedido à água (calor sensível). Logo, quanto maior for a temperatura da água de alimentação menor será a quantidade de calor necessário para sua vaporização. Como regra geral é possível adotar que a cada aumento de temperatura de 5/6 °C obtêm-se uma economia de 1% no consumo de combustível (RODRIGUES, 2012).

Com o incremento da temperatura da água no tanque de alimentação pode-se também alcançar maior estabilidade do sistema de vapor. Caso haja oscilações muito bruscas na temperatura haverá interrupções na vaporização, já que levará mais tempo para atingir o ponto de ebulição além de causar choques térmicos provocados pela entrada de água a temperatura mais baixa. Como consequência, o

rendimento de todo sistema será comprometido causando perdas de pressão e condensação nas linhas de distribuição (SPIRAX SARCO, 2011).

Outro fator importante para manter a temperatura de alimentação elevada é a quantidade de oxigênio livre na água. O oxigênio dissolvido constitui o principal parâmetro de controle da corrosão, no circuito de água de alimentação de caldeira (ASME, 2001). A relação entre a temperatura da água e quantidade de oxigênio dissolvido pode ser visto na Figura 13. Deve-se verificar também a possibilidade de utilização de produtos químicos para promover a remoção do oxigênio livre.

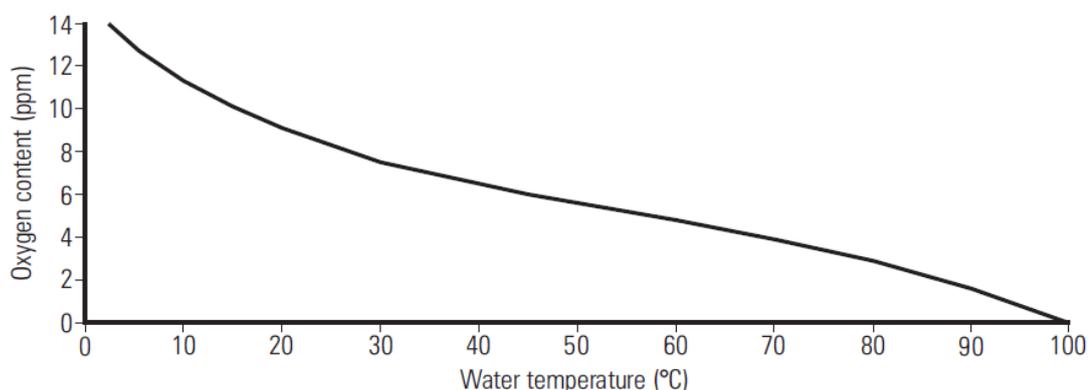


Figura 13. Relação entre o oxigênio livre e a temperatura da água.

Fonte: Spirax, Sarco (2011).

Existem algumas formas de elevar a temperatura da água de alimentação, entre elas estão (SPIRAX SARCO, 2011):

- Retorno de maior volume de condensado mantendo sua temperatura nas linhas;
- Utilizar vapor flash das descargas de nível;
- Instalação de um trocador de calor na entrada do tanque de alimentação que utilize o calor sensível dos gases da chaminé (economizador);
- Injeção de vapor vivo.

5.2.4 Pré-aquecedor de Ar

Através da utilização dos fluxos de calor residual como fonte de energia alternativa é possível reduzir custos e aumentar a sustentabilidade do processo. Um exemplo dessa prática é a recuperação do calor dos gases da chaminé para aumentar a temperatura do ar utilizado na queima do combustível (MARTINELLI JUNIOR, 1998; LEITE; MILITÃO, 2008).

A instalação do pré-aquecedor ajuda na redução da temperatura dos gases da chaminé contribuindo na melhora a eficiência da combustão permitindo a redução no consumo de combustível (MARTINELLI JUNIOR, 1998; LEITE; MILITÃO, 2008).

Os gases da chaminé também podem ser utilizados como fonte alternativa de energia para secagem de combustíveis sólidos úmidos (biomassa), através da injeção direta (ELETROBRAS, 2005b; RODRIGUES, 2012).

5.2.5 Transferências de Calor no Costado da Caldeira

As perdas no costado da caldeira são classificadas como transferências de calor por convecção e por radiação. Tem como força motriz a diferença entre a temperatura do costado e a temperatura ambiente. Porém, sua medição é bastante complexa, mas de forma geral, estima-se uma perda de 1 a 4% de energia (ELETROBRAS, 2005b).

Uma forma de diminuir esse fluxo de desperdício é melhorar o isolamento térmico, ou realizar a manutenção periódica do existente. O monitoramento de pontos quentes no costado pode indicar problemas no refratário (RODRIGUES, 2012).

5.2.6 Calor na Descarga de Superfície

As descargas de superfície devem ser feitas sempre que a água dentro da caldeira fica concentrada de sais minerais. O tratamento de água pode modificar quimicamente a forma dos sólidos totais dissolvidos (STD), porém não irá removê-los completamente. Assim, para manter os níveis baixos são feitas descargas periódicas (ONOFRE, 2011).

À medida que a caldeira produz vapor, os sais que entram com a água de reposição acumulam, se a descarga não for feita haverá o risco de arraste de água para o sistema de vapor causando golpes de aríete, incrustação nas superfícies de troca térmica, corrosão e diminuição do título do vapor (SPIRAX SARCO, 2011).

O arraste de água ocorre quando gotículas de água e espumas são carregadas pelo vapor. A presença de sais minerais na análise do condensado pode comprovar a ocorrência do arraste (RODRIGUES, 2012).

As descargas podem ser controladas manualmente e de forma automática. A automação dos controles de processo garante precisão, segurança e economia (ONOFRE, 2011; FIALHO, 2007). Com o monitoramento do STD da água é possível determinar o ponto em que deve ser realizada a descarga. O monitoramento pode ser feito através de análises físico-químicas ou de um sensor de condutividade térmica instalado na caldeira (SPIRAX SARCO, 2011). Quanto maior for a condutividade da água maior será o STD, portanto maior será o número de descargas.

A vazão das descargas pode ser determinada utilizando a equação (10) (RODRIGUES, 2012; HARREL, 1996). Parte da água ao ser descarregada a pressão atmosférica vai reevaporar, podendo então ser utilizada como fonte de energia alternativa em processos que permitam o uso de vapor de baixa pressão.

$$\% \text{ Descarga} = \frac{STD \cdot 100}{C - STD} \quad (10)$$

5.2.7 Calor na Descarga de Fundo

As descargas de fundo fazem parte da operação da caldeira. Sem as descargas, depósitos de impurezas presentes na água podem se formar no fundo da caldeira e reduzir as taxas de troca térmica. Além disso, a água da descarga é fonte potencial de energia térmica já que estará a mesma temperatura e pressão que a caldeira (KROLL, 2008; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Quando a água evapora dentro da caldeira, os sólidos presentes na água de alimentação ficam retidos e por serem mais pesados se depositam no fundo. Para diminuir os níveis dessas impurezas a limites aceitáveis devem ser feitas descargas periódicas que durem alguns segundos em intervalos de algumas horas (KROLL, 2008; CIBO, 1997). A qualidade da água de alimentação e melhorias no tratamento da água ajudam a reduzir as descargas (ELETROBRAS, 2005b).

Descargas excessivas irão conduzir a perdas de energia, água e tratamento. Descargas insuficientes poderão levar a formação de depósitos atrapalhando o desempenho do sistema. Vários fatores são levados em conta na otimização do número de descarga, incluindo o tipo de caldeira, a pressão de operação e a composição da água. Geralmente as taxas de descarga variam de 4 a 8% do fluxo da água de alimentação (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; CIBO, 1997).

Outro fator importante na otimização das descargas é a automatização do sistema de controle. Somente com a automação é possível regular as taxas do volume das descargas em função da concentração de sólidos presentes. Assim, além de manter a composição química da água dentro de limites aceitáveis, as descargas são reduzidas e as perdas de energia minimizadas (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Uma forma de reduzir as perdas de energia térmica é a recuperação do calor da água depois da descarga. Uma forma simples e barata é utilizar um trocador de calor por onde todas as descargas passem para pré-aquecer a água de alimentação. Um sistema de reaproveitamento mais complexo pode incluir a recuperação do vapor flash.

A economia com os sistemas de recuperação do calor das descargas podem ser significativas, em muitos casos mais de 90% da energia utilizada no aquecimento da água descarregada pode ser recuperada. Essas economias podem

resultar em projetos com *payback* (período de retorno) de menos de um ano (KROLL, 2008; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

5.2.8 Calor na Combustão de Biomassa Úmida

Atualmente há programas de incentivos no mundo inteiro para utilização de fontes alternativas de energia. Um exemplo é o uso da biomassa como combustível (BARROS et. al., 2004). O termo biomassa engloba a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais, etc. (LORA; NOGUEIRA, 2003).

A presença de umidade no combustível irá reduzir o rendimento da combustão, consumindo parte da energia liberada para evaporar. A Tabela 3 mostra a influência da umidade da lenha no poder calorífico inferior.

Tabela 3. Influência da umidade no poder calorífico.

Umidade (%)	PCI (kcal/kg)	Umidade (%)	PCI (kcal/kg)
0	4438,3	45	2171,1
5	4186,4	50	1919,2
10	3934,5	55	1667,3
15	3682,6	60	1415,3
20	3430,7	65	1163,4
25	3178,8	70	911,5
30	2926,8	75	659,6
35	2674,9	80	407,7
40	2423,0	85	155,8

Fonte: Eletrobrás (2005b).

A utilização de biomassa como combustível traz inúmeros benefícios para o meio ambiente, tornando possível a redução dos custos com efluentes e o aumento da sustentabilidade do processo.

5.3 RENDIMENTO DA CALDEIRA

Os parâmetros de desempenho da caldeira, como a eficiência e a taxa de evaporação, podem reduzir com o tempo devido a diminuição do rendimento da combustão. Sujeiras nas superfícies de transferência de calor, erros de operação e falta de manutenção podem influenciar. Avaliações da eficiência da caldeira ajudam a descobrir os pontos de desvio de rendimento, e assim identificar as oportunidades de conservação de energia (CIBO, 1997; SPIRAX SARCO, 2004).

O custo do vapor é o principal índice de referência (*benchmark*) em um programa de gerenciamento de um sistema de vapor. Utilizando esse parâmetro é possível ter um panorama real de todos os aspectos econômicos para geração de vapor (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2003).

5.3.1 Custo da Geração de Vapor

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2003), saber o custo real do vapor é importante por muitas razões, sendo a maioria relacionada com os aspectos econômicos, como:

- Avaliação adequada da eficiência do sistema e das oportunidades de projetos de melhoria. Se o custo calculado não é exato, muitos bons projetos para racionalização no uso de energia podem ser rejeitados;
- Serve de base para a otimização do sistema de geração;
- Avaliação da produtividade e dos custos da produção.

Os fatores que podem influenciar no valor do custo são o tipo de combustível, o preço do combustível, a eficiência da caldeira, a temperatura da água de alimentação e a pressão de operação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; CIBO 1997).

A Tabela 4 mostra a energia necessária para produzir um quilograma de vapor saturado a diferentes pressões de operação e temperaturas da água de alimentação. A Tabela 5 apresenta o conteúdo energético e a eficiência de combustão para os combustíveis mais utilizados na indústria.

Tabela 4. Energia necessária (kcal/kg) para gerar um quilograma de vapor saturado.

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

Fonte: Eletrobrás (2005b).

Tabela 5. Eficiência da combustão de combustíveis comuns.

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.2 (L)	9.230	84,6
Óleo residual n.6 (L)	9.960	86,1
Carvão (kg)	6.800	87,6

Fonte: Eletrobrás (2005b).

O custo do vapor (R\$/kg) pode ser obtido a partir da equação (11). Para a obtenção de um valor mais próximo do real pode ser incluído nos cálculos os custos operacionais e de instalação de acessórios. Índices de referência para o Brasil são apresentados na Tabela 1.

$$Custo_{vapor} = \frac{Custo_{combustível} \cdot (h_g)}{PCI \cdot \eta_{caldeira}} \quad (11)$$

5.3.2 Eficiência da Caldeira

O grau de afastamento do comportamento ideal pode ser obtido através da avaliação da eficiência. As perdas observadas em processos reais, onde há geração de entropia, podem ser identificadas e reduzidas com o monitoramento do rendimento. Outro aspecto importante é o econômico. Toda perda conduz a um aumento no custo e deve ser minimizada buscando sempre a operação com eficiência máxima (CIBO, 1997; ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência térmica da caldeira é definida como a porcentagem de entrada de calor que é eficazmente utilizado para gerar vapor. O cálculo da eficiência da caldeira pode ser feito pelo método direto e pelo método indireto (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; HARRELL, 1996):

- Método direto: Onde a energia cedida ao fluido de trabalho é comparada com a energia contida no combustível;
- Método indireto: Onde a eficiência é a diferença entre as perdas e a energia inserida no sistema.

A eficiência da caldeira pelo método direto pode ser obtida através da equação (12). Para o cálculo, somente a saída de vapor útil e o calor cedido pelo combustível são considerados. Os seguintes parâmetros devem ser monitorados para este cálculo (CIBO, 1997; BIZZO, 2012):

1. Quantidade de vapor gerado;
2. Quantidade de combustível utilizado;
3. A pressão de operação;
4. A temperatura da água de alimentação;
5. O tipo de combustível para determinação do poder calorífico.

$$\eta_{cal} = \frac{\text{Calor útil}_{vapor}}{\text{Calor cedido}_{combustível}} \quad (12)$$

$$\eta_{caldeira} = \frac{\dot{m}_{vapor} \cdot (h_{fg} - h_f)}{\dot{m}_{combustível} \cdot PCI} \quad (12.a)$$

Através do método indireto é possível obter um parâmetro mais próximo do real uma vez que são levadas em conta todas as perdas existentes no sistema. As desvantagens do método direto podem ser superadas através deste método. As perdas que devem ser consideradas neste cálculo são relacionadas a seguir junto com a equação para obtenção dos seus valores (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b; CIBO, 1997; HARRELL, 1996):

- Perdas pela chaminé = $\dot{m}_{gases} \cdot c_{ar} \cdot (T_{gases} - T_{ambiente})$ (13)

- Perdas por radiação e convecção: Devido a complexidade dos cálculos envolvidos, como regra geral é considerado de 1-4% dependendo da temperatura externa (ambiente) e o tipo de isolamento utilizado.

- Perdas nas descargas de fundo = $\dot{m}_{descarga} \cdot c_{\acute{a}gua} \cdot (T_{satura\c{c}ao} - T_{ambiente})$ (14)

- Perdas relacionadas à temperatura das cinzas: $m_{cinzas} \cdot 1170$ (15)

- Perdas relacionadas ao combustível não queimado = $m_{carbono} \cdot 3370$ (16)

Após a determinação das perdas é possível obter a eficiência da caldeira subtraindo suas frações de 100%. Caso a unidade das perdas seja mantida em quantidade de energia por massa de combustível (kJ/kg), basta dividir o somatório das perdas pelo poder calorífico (PC) do combustível, dado então pela equação (17).

$$\eta_{caldeira} = 1 - \frac{\sum Perdas}{PC} \quad (17)$$

6 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

O sistema de distribuição é responsável pelo transporte do vapor aos pontos de consumo através das linhas de vapor. Além de regular a entrega de vapor, deve responder as mudanças de temperatura e pressão requeridas. Assim, para um desempenho eficiente é imprescindível um projeto de dimensionamento cuidadoso e a realização de manutenção frequente.

A eficiência do sistema de distribuição é determinada pela capacidade de conduzir o vapor da caldeira até os pontos de uso com a menor perda térmica possível. Os principais fatores que podem contribuir para redução das perdas nas linhas são a drenagem correta e o isolamento térmico. A drenagem eficiente garante altas taxas de transferência de calor. Já o isolamento na espessura correta mantém o calor confinado nas tubulações com menor dissipação para o ambiente.

6.1.TUBULAÇÃO

As tubulações devem ser preferencialmente de aço carbono ou cobre para evitar corrosões e ferrugem. Além disso, deve ser instalada com isolamento térmico garantindo perdas mínimas de calor por radiação (SPIRAX SARCO, 2011). São submetidas à pressão de projeto e adaptadas a uma variação significativa de temperatura. As linhas de distribuição estão sujeitas a dilatações e contrações, devido a aquecimentos e resfriamentos sofridos durante a operação. Isso requer um estudo de flexibilidade da rede, introduzindo-se, se necessário, juntas de expansão (SPIRAX SARCO, 2004; TELLES, 1999).

Ao percorrer a tubulação principal parte do vapor condensa devido às perdas de energia no percurso, logo o vapor mais seco estará na parte superior da tubulação. Para garantir a qualidade do vapor, as ramificações, que irão direcionar o vapor para os pontos de consumo a partir da linha principal, devem ser feitas na parte superior da tubulação principal, como é mostrado na Figura 14.

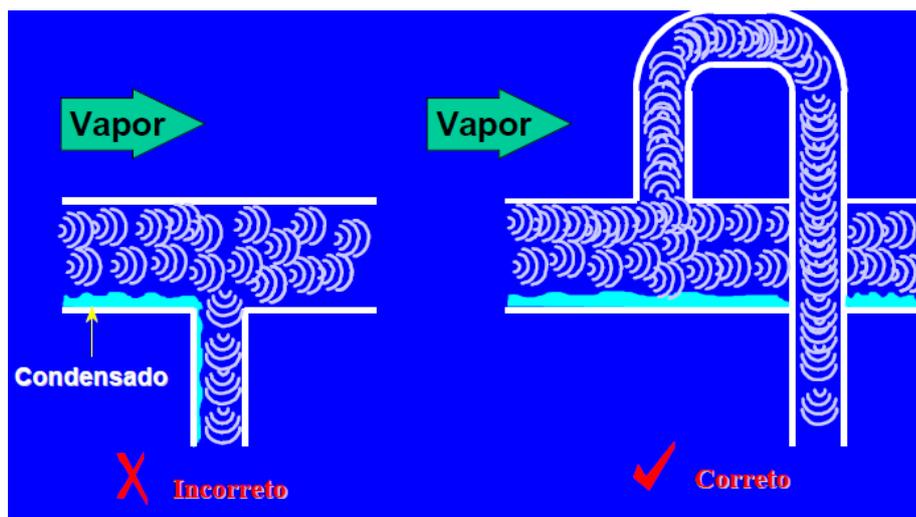


Figura 14. Linhas secundárias para distribuição de vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

6.1.1 Dimensionamento

As linhas de vapor conduzem vapor para os pontos de consumo e seu dimensionamento deve garantir a distribuição de vapor na quantidade e pressão requeridas. Linhas superdimensionadas além de encarecer a instalação com materiais e isolamentos podem aumentar a formação de condensado. Porém, diminuem a queda de pressão para uma dada taxa de fluxo e ajudam a diminuir o ruído associado ao fluxo de vapor. Já as linhas subdimensionadas podem comprometer todo sistema de distribuição de vapor, com risco de falta de vapor, erosões, golpes de aríete e cavitação, além de entregar vapor no ponto de uso com pressão menor que a requerida (SPIRAX SARCO, 2005; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

O dimensionamento pode ser feito seguindo dois critérios: velocidade ou perda de carga. Os cálculos baseados na velocidade levarão em conta o volume específico do vapor e a área seccional da tubulação. A prática demonstra que as velocidades de 20 a 30 m/s são razoáveis para vapor saturado. Acima disso é possível gerar problemas de ruídos e erosão. Em ramais secundários e tubulações curtas a velocidade de 15 m/s é mais conveniente para evitar perdas de carga (IBP, 1975).

O dimensionamento baseado na velocidade não leva em conta a extensão da tubulação, que quanto mais longa for, menor será a pressão disponível no ponto de consumo. Nesse caso, para atingir o máximo aproveitamento do vapor, o dimensionamento pelo método da perda de carga é indicado, já que fornece dados de pressão em qualquer ponto da tubulação (SPIRAX SARCO, 2004; IBP, 1975).

6.2 ISOLAMENTO TÉRMICO

A condução térmica é um meio de transferência de calor e ocorre devido à diferença de temperatura entre o meio externo e a temperatura do vapor. A quantidade de calor transferido é função do gradiente de temperatura do ambiente, da espessura da tubulação e da sua constante de condutividade térmica (encontrada em tabelas) (INCROPERA et. al., 2008).

O isolante térmico é composto por infinitos espaços microscópios formando uma barreira à transmissão de calor. Possui uma constante de condutividade térmica muito pequena reduzindo as perdas de calor por irradiação para o meio, o que torna possível manter o calor confinado dentro das tubulações (NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009).

Todas as superfícies que possam perder calor devem ser isoladas, incluindo tubulações, válvulas, flanges, conexões, etc. Além da queima desnecessária de combustível que as perdas de calor por irradiação representam, a falta de isolamento térmico ou o isolamento deficiente ocasionará a formação de uma grande película de condensado, o que irá diminuir consideravelmente a qualidade do vapor (IBP, 1975).

Em termos de segurança, o isolamento reduz a temperatura da superfície exterior da tubulação de vapor, o que diminui o risco de acidentes. Um sistema bem isolado também reduz a irradiação de calor para espaços de trabalho, o que pode tornar o ambiente de trabalho mais confortável. Assim, os benefícios do isolamento incluem as reduções nas perdas de energia e dos encargos sobre os sistemas de refrigeração que removem o calor de espaços de trabalho (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). Portanto, a utilização de isolamento térmico conjuga segurança, benefícios econômicos e de desempenho.

Em função dos custos do combustível, deve-se proporcionar o isolamento com eficiência não inferior a 80% (SPIRAX SARCO, 2011). Para determinar a espessura do isolante é importante considerar a temperatura superficial da cobertura do isolante como fator de segurança (ELETROBRAS, 2005b). Além disso, a espessura ideal é resultante da comparação econômica entre o custo do isolamento e o da energia perdida buscando, uma solução em que o custo total seja mínimo, como representado na Figura 15.

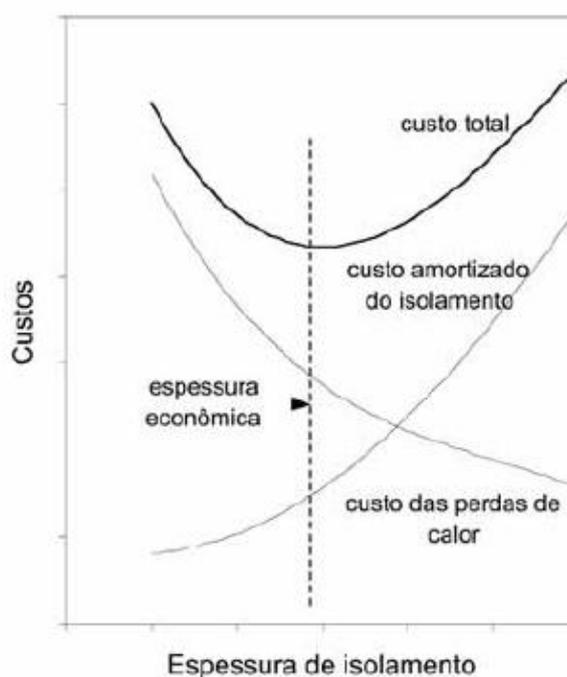


Figura 15. Determinação da espessura econômica
Fonte: Nascimento Junior; Sartorelli (2009).

A ausência ou ineficiência do isolamento no sistema de distribuição de vapor e nas linhas de retorno de condensado são uma constante fonte de desperdício de energia. A Tabela 6 mostra as perdas de energia (Watts/ano) típicas de linhas de vapor sem isolamento térmico, considerando 100 metros de tubulação horizontal de aço, temperatura ambiente de 24 °C e operação em tempo integral de 8760 horas/ano.

Tabela 6. Perda de energia (Watts/ano) em 100 metros de tubulação sem isolamento.

Diâmetro do tubo (pol)	Pressão do vapor (bar)			
	1	10	20	30
1	4.680,7	9.528,5	12.537,5	16.549,5
2	7.856,8	16.048	21.063	28.084
4	13.874,8	28.418,4	37.445,4	50.150
8	24.740,7	51.487,5	67.869,8	91.106
12	35.272,2	73.553,5	97.291,2	131.059

Fonte: U.S. Department of Energy (2000).

6.3 ALAGAMENTO

A resistência à transferência de calor é causada pelas diferentes películas existentes entre o vapor e o produto que se quer aquecer. Outros fatores que influenciam são o diferencial de temperatura entre o vapor e o produto, a área de transferência de calor e o coeficiente de transferência de calor, que é próprio dos materiais e das condições em que se encontram (SPIRAX SARCO, 2005). Os três últimos são previstos no projeto do sistema, já as películas que se interpõem entre o vapor e o produto geralmente são resultantes de manutenção ineficiente e geram grandes perdas.

Depois de ceder calor latente no processo de aquecimento, o vapor volta ao estado líquido e deve ser removido da linha para que não comprometa a qualidade do vapor ou acumule provocando alagamento, demonstrado na Figura 16. O condensado passa a ocupar a área de transferência de calor do vapor diminuindo a temperatura das superfícies de troca térmica e reduzindo o fluxo de calor.

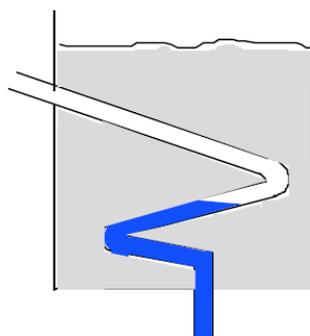


Figura 16. Alagamento na linha de vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

A água gerada por efeito do processo de condensação deve ser drenada e direcionada para fora das linhas de distribuição. Um sistema eficiente deve acumular todo condensado e devolvê-lo a um desaerador ou para alimentação da caldeira. Em alguns processos é possível aproveitar o calor sensível do condensado.

6.4 DRENAGEM DO CONDENSADO

Ao perder calor, o vapor passa pelo processo de condensação, voltando ao estado líquido. Este processo é exatamente o inverso do que ocorre na caldeira. A força motriz para condensação é o diferencial de temperatura e ocorre quando o vapor cede calor em processos de aquecimento, com o contato com as superfícies frias da tubulação, ou ainda devido a perdas de calor por irradiação ao longo das linhas. O condensado pode estar presente nas linhas também devido arrastamento de água proveniente da caldeira. (SPIRAX SARCO, 2012; IBP, 1975).

Para garantir a eficiência do sistema de vapor, todo condensado formado nas linhas de vapor deve ser drenado. Entre as causas da diminuição do desempenho se destacam (TELLES, 1999):

- Redução do poder de aquecimento do vapor: o condensado retém apenas o calor sensível. Assim, a entrada ou permanência de condensado nos equipamentos atrapalham seu desempenho.

- Golpes de aríete e vibrações nas tubulações: ocorrem devido o deslocamento do condensado junto do vapor em alta velocidade.
- Efeitos da corrosão: o condensado combina-se com o CO₂ existente no vapor formando o ácido carbônico, de alto poder corrosivo.
- Redução da seção transversal útil de escoamento do vapor devido à acumulação do condensado.

Portanto, a drenagem do condensado é parte essencial no sistema de distribuição de vapor. Na Tabela 7 é demonstrada a quantidade de condensado formado em um sistema de vapor durante a operação a cada 30 metros de tubulação com isolamento com 80% de eficiência e temperatura ambiente de 22 °C. Caso o sistema de drenagem falhar, rapidamente a eficiência do processo irá ser comprometida devido o acúmulo de condensado.

Tabela 7. Formação de condensado (kg/h) em 30 metros de tubulação.

Pressão (kg/cm ²)	Diâmetro												
	2"	2 ½"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"
0,7	2,7	3,1	4,0	4,9	7,2	9	11	13	14	16	17	20	24
2,1	3,6	4,0	4,9	6,3	8,9	12	14	17	19	21	22	25	30
4,2	4,5	5,4	6,3	8,0	12,0	15	18	22	24	28	30	33	40
7,0	5,4	6,7	8,0	9,8	14,7	18	23	27	30	34	37	42	50
8,5	5,8	7,2	8,9	10,7	16,1	20	25	30	33	38	40	45	54
12,0	7,1	8,5	10,3	11,6	17,0	24	30	35	38	44	48	53	63
17,5	8,1	9,8	12,1	15,2	22,3	28	34	41	45	52	56	53	75
21,0	8,9	11,2	13,4	16,5	24,1	30	38	45	50	56	62	69	82

Fonte: Spirax Sarco (2004).

Para eliminação do condensado é possível utilizar válvulas operadas manualmente ou automáticas. A prática mostra que a automatização desse processo torna-o muito mais seguro e eficaz, garantindo a descarga do condensado sem perda de vapor.

As válvulas automáticas para esse fim são chamadas de purgadores de vapor (*steam-traps*). Elas eliminam o condensado formado nas tubulações de vapor

e nos diversos processos e equipamentos utilizados, não permitindo escapar vapor. Os bons purgadores, além de removerem o condensado, eliminam também o ar e outros gases incondensáveis (CO_2) que possam estar presentes (TELLES, 1999).

6.5 PONTOS DE DRENAGEM

Os pontos de drenagem devem assegurar que o condensado seja conduzido até um purgador. Nos pontos baixos da tubulação e equipamentos o condensado forma uma película de líquido, sendo necessária a instalação de purgadores. O condensado também se acumulará ao longo da linha horizontal devendo ser feita instalação de pontos de drenagem a cada 30 metros lineares de tubulação. Além disso, haverá acúmulo de condensado em mudanças de nível, finais de linha e antes de válvulas (SPIRAX SARCO, 2005).

Para remover o condensado formado a partir do fluxo de vapor saturado nas linhas são instaladas botas coletoras, mostradas na Figura 17. O dimensionamento errado deste acessório acarretará em uma purga ineficiente, já que somente uma parte do condensado formado será escoado para o purgador. A Figura 18 mostra uma tabela para o correto dimensionamento das botas coletoras.

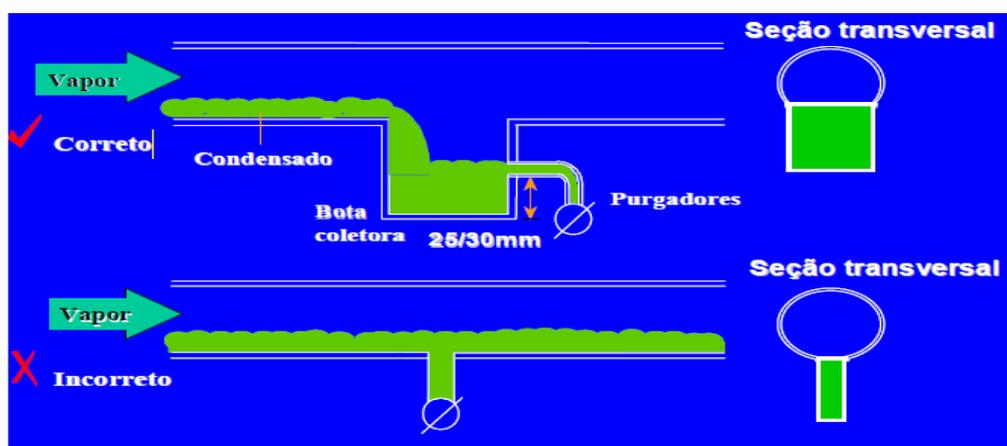


Figura 17. Instalação correta da bota coletora.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

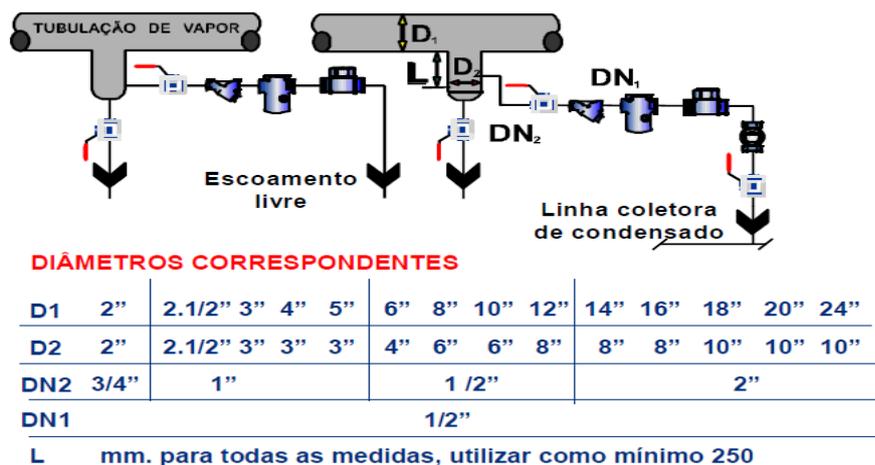


Figura 18. Dimensionamento das botas coletoras.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

A separação entre os pontos de drenagem de condensado nas linhas que conduzem o vapor saturado devem ser de 30 a 50 metros com 1 metros de queda para cada 100 metros de tubulação horizontal para facilitar o escoamento do condensado até o purgador, como mostra a Figura 19.

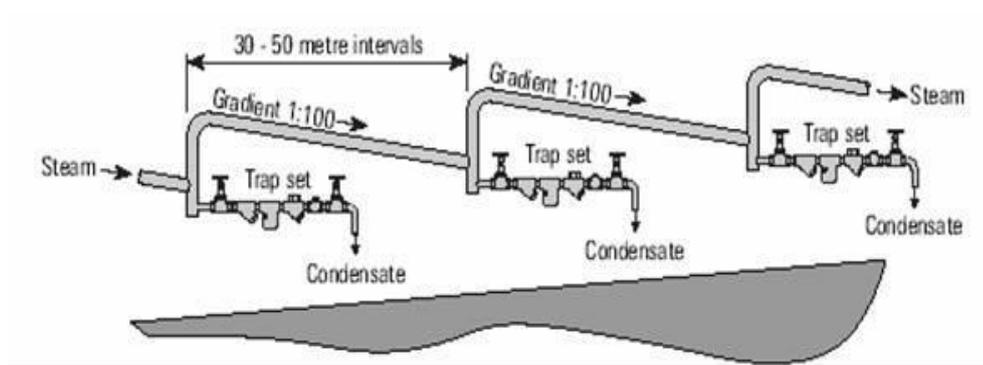


Figura 19. Layout da tubulação de drenagem de condensado.

Fonte: Spirax Sarco (2011).

O purgador está precedido de um filtro e, em seguida, vai instalada uma válvula de retenção, para evitar que o condensado retorne ao purgador nos períodos de parada. Os filtros tem por finalidade reter sujeiras grosserias que possam danificar o equipamento, reduzindo paradas para manutenção. Os filtros Y, mais utilizados no conjunto purgador, devem ser montados nas linhas de vapor

mantendo-os sempre na posição horizontal, evitando a formação da bolsa de condensado (SPIRAX SARCO, 2011). O conjunto purgador está ilustrado na Figura 20.

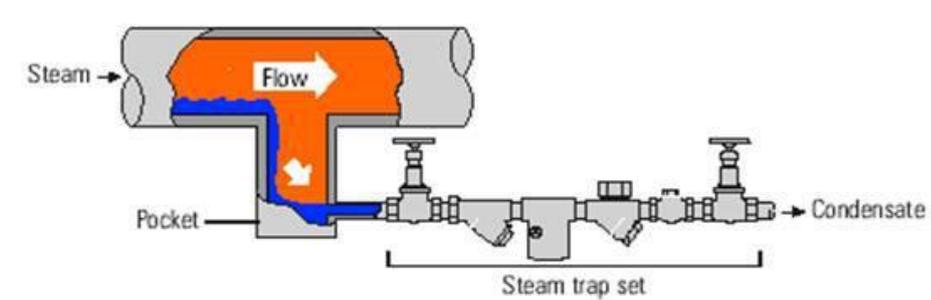


Figura 20. Conjunto purgador.

Fonte: Spirax Sarco (2011).

Nos pontos da tubulação onde há reduções, a mesma deve ser excêntrica com o lado reto na parte superior da tubulação. As reduções concêntricas são potencial fonte de golpes de aríete (SPIRAX SARCO, 2005). A montagem está ilustrada na Figura 21.

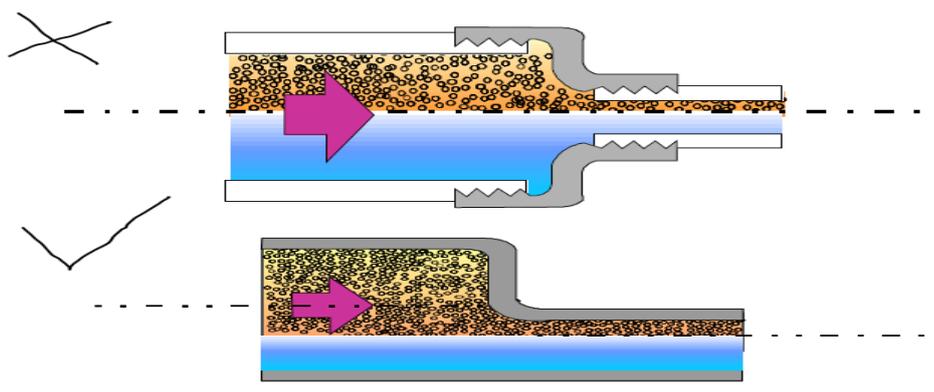


Figura 21. Instalação de reduções nas linhas de vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

6.6 DRENAGEM COLETIVA

Drenagem coletiva é um termo utilizado para descrever o uso de um único purgador para drenar dois ou mais pontos de drenagem. A pressão de entrada diminui em função da distância da linha principal e de outros pontos consumidores próximos. Assim, equipamentos mais próximos ao ramal principal terão maior pressão. Na saída do condensado esses pontos irão prevalecer, impedindo que o fluxo de condensado do segundo ponto, a menor pressão, escoe. O resultado será o alagamento e ineficiência da troca térmica. O alagamento pode dar sequência a corrosão e golpes de aríete (SPIRAX SARCO, 2005; RODRIGUES, 2012). A drenagem coletiva deve ser evitada e está ilustrada na Figura 22.

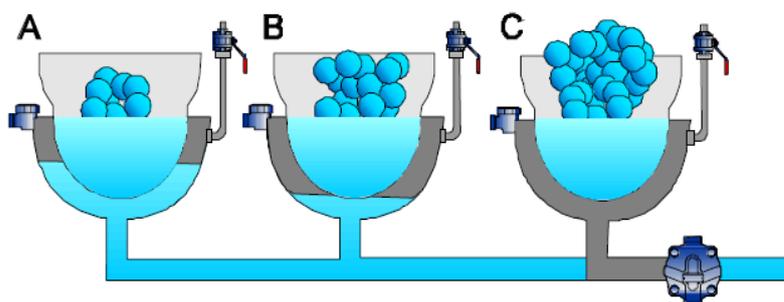


Figura 22. Drenagem coletiva.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

Assim, a disposição ideal em termos de eficiência de processo ocorre onde cada área de transferência de calor tem seu purgador, como mostra a Figura 23. Os aspectos que levam a opção pela drenagem coletiva são geralmente econômicos. Porém, essa economia torna-se prejuízo pela baixa eficiência e produtividade alcançadas posteriormente.

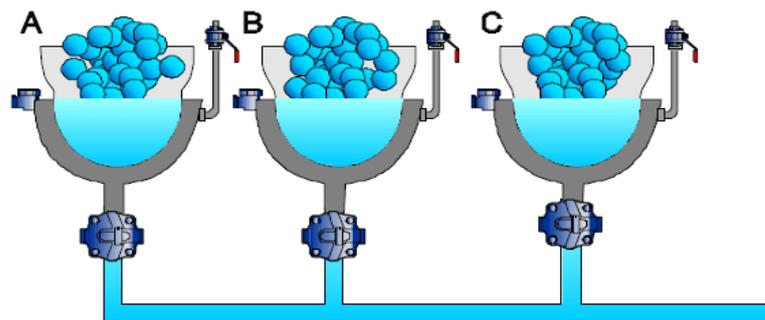


Figura 23. Disposição ideal para drenagem.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

6.7 PURGADORES

Os purgadores são dispositivos automáticos com função de drenar todo condensado das linhas de distribuição e pontos de utilização de vapor. É importante que a purga aconteça no momento da formação do condensado para que não ocorra a diminuição da área de transferência de calor ou queda da temperatura nos pontos de uso (TELLES, 1999; SPIRAX SARCO, 2011; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1999).

Estes dispositivos estabelecem o limite entre o vapor e o condensado, problemas no seu funcionamento irão causar escape de vapor e conseqüentemente, perdas de energia e econômicas (PALACIOS, 2010). Além disso, um sistema de drenagem ineficiente pode prejudicar seriamente a produtividade de uma indústria. O Quadro 2 apresenta os principais efeitos da drenagem ineficiente ou incorreta do condensado.

Efeito	Descrição
Contrapressão	Todos os purgadores operam em contrapressão, então para que a purga ocorra a pressão de entrada sempre deve ser superior a contrapressão. O aumento da contrapressão pode ser ocasionado por vapor flash da linha de retorno do condensado subdimensionada, diminuindo a capacidade de vazão do purgador.
Alagamento	O alagamento das linhas ocorre quando a velocidade de formação de condensado é superior a da drenagem. Esse efeito reduz a transferência de calor.
Estolagem	Redução da pressão antes do purgador devido a ação de válvulas termostáticas provocando alagamento. Esse efeito é comum em equipamentos submetidos a controle de temperatura e pode ser sanado com a instalação de um sistema de bombeamento junto ao purgador.
Golpe de aríete	A massa de condensado arrastada pelo vapor através das tubulações ao encontrar um obstáculo (purgador, filtros, válvulas, mudança de direção) causa um impacto violento, provocando alto nível de ruído ou até mesmo rompimento de conexões e acessórios.
Vapor preso	Ocorre entre o ponto de coleta do condensado e a entrada do purgador quando a tubulação está envolvida por vapor de alta temperatura ou quando o purgador é instalado distante do ponto de drenagem. O vapor irá demorar a condensar impedindo que o condensado chegue ao purgador. O problema pode ser solucionado com a instalação de um eliminador de vapor preso.
Corrosão	Condensado corrosivo pode ser gerado devido ao tratamento ineficiente da água de alimentação da caldeira ou devido à combinação do condensado com o CO ₂ existente no vapor, formando o ácido carbônico.

Quadro 2. Efeitos da drenagem ineficiente ou incorreta.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

Não existe um purgador que possa ser utilizado em qualquer condição de processo, ou seja, um purgador universal. Para correta seleção, é preciso conhecer os vários tipos existentes, bem como as vantagens e desvantagens da instalação e ganhos econômicos na aplicação de cada um. Além disso, algumas observações devem ser feitas na escolha final, como (SPIRAX SARCO, 2004):

- Drenagem no momento de formação do condensado ou admite-se alagamentos;

- Nível da linha de retorno de condensado e contrapressões nos purgadores;
- Nível de incidência de golpes de aríete e vibrações;
- Presença de condensado corrosivo e ar no sistema;
- Ocorrência de vapor preso e condições de operação dos purgadores.

Existem dois casos típicos de aplicação de purgadores que devem ser esclarecidos já que as instalações são completamente distintas. O primeiro é o emprego do purgador para eliminação do condensado formado nas tubulações de vapor. O segundo é para reter o vapor nos equipamentos, deixando sair apenas o condensado (TELLES, 1999; ELETROBRAS, 2005b).

Os tipos de purgadores existentes se diferem entre si principalmente pela forma de acionamento. São classificados em três categorias: Termostáticos, mecânicos e termodinâmicos (IBP 1975; PALÁCIOS, 2010; SPIRAX SARCO, 2012a. TELLES, 1999; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Os purgadores termostáticos são acionados devido à diferença de temperatura entre o vapor e o condensado, sensibilizado por um elemento termostático. Para ser eliminado o condensado deve atingir uma temperatura abaixo da temperatura de saturação logo, estes purgadores vão reter o condensado até que ele perca seu calor sensível. Dentro desta categoria temos o purgador termostático de pressão balanceada, de expansão líquida e bimetálicos (IBP 1975; PALACIOS, 2010; SPIRAX SARCO, 2004. TELLES, 1999, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

A operação dos purgadores mecânicos é baseada na diferença de densidade entre o vapor e o condensado. A partir dessa diferença um elemento se movimenta em um determinado sentido, atuando sobre o orifício de descarga. Dentro desta categoria temos o purgador mecânico de bóia livre, de bóia e alavanca, de balde aberto e de balde invertido (IBP 1975; PALACIOS, 2010; SPIRAX SARCO, 2012a. TELLES, 1999, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Purgadores termodinâmicos operam baseados no princípio de variação de pressão estática e dinâmica de Bernoulli, em função da velocidade. Utilizam a diferença de energia cinética entre o vapor e o condensado para operar uma válvula. Essa ação ocorre em um disco que bloqueia a passagem com a alta velocidade do reevaporado e abre com a baixa velocidade do condensado (IBP 1975; PALACIOS,

2010; SPIRAX SARCO, 2005. TELLES, 1999, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Existem ainda outros tipos de purgadores que não se encaixam em nenhuma das categorias citadas acima, são os purgadores tipo labirinto e tipo impulso (SPIRAX SARCO, 2000, IBP, 1975). O Quadro 3 apresenta os principais tipos de purgadores citados e suas principais características de operação.

Tipo	Características
Termostático de pressão balanceada	<ul style="list-style-type: none"> -Grande capacidade de descarga; -Excelentes eliminadores de ar; -Ajustam-se automaticamente as variações de pressão do sistema; -Fácil manutenção; -Podem sofrer avarias por golpes de aríete; -Podem ser projetados para resistir ao condensado corrosivo; -Descarregam o condensado abaixo da temperatura do vapor, podendo causar alagamentos.
Termostático de expansão líquida	<ul style="list-style-type: none"> -Permite ajustes para descarregar condensado a baixas temperaturas (podendo ser aproveitado o calor sensível); -Excelentes eliminadores de ar; -Resistentes a golpes de aríete e vibrações; -Absorvem grande parte da variação de pressão; -Baixa resistência à presença de condensado corrosivo; -Descarregam o condensado abaixo da temperatura do vapor, podendo causar alagamentos.
Termostático bimetálico	<ul style="list-style-type: none"> -Grande capacidade de descarga; -Excelentes eliminadores de ar; -Resistentes a golpes de aríete; -Podem ser projetados para resistir ao condensado corrosivo; -Podem trabalhar com vapor superaquecido e em altas pressões; -Possuem obturador na saída que serve como retenção ao fluxo inverso; -Fácil manutenção; -Não respondem rapidamente as variações de pressão; -Descarregam o condensado abaixo da temperatura do vapor, podendo causar alagamentos.

Tipo	Características
Mecânico de balde invertido	<ul style="list-style-type: none"> -Atendem a altas pressões; -Resistentes a golpes de aríete e condensado corrosivo; -Eliminam ar de forma lenta; -Necessitam de selo d'água para operar; -Necessitam de válvula de retenção na entrada para se evitar a perda do selo d'água, em função de variações de pressão.
Termodinâmicos	<ul style="list-style-type: none"> - Não necessitam de ajustem em função das variações de pressão; -São compactos e possuem grandes capacidades de descarga; -Admitem altas pressões; -Resistentes a golpes de aríete e condensado corrosivo; -Fácil manutenção; -Podem operar em qualquer posição; -Não admitem contrapressões ou pressões diferenciais baixas; -Eliminam o ar, desde que a pressão no início do processo se eleve lentamente; -Descarregam o condensado de forma intermitente; -Não atendem bem grandes variações de pressão e vazão de condensado; -Quando instalados em ambientes expostos a atmosfera, é imprescindível a montagem de uma proteção sobre a tampa para evitar a rápida condensação do vapor flash na câmara de controle.
Mecânico de boia	<ul style="list-style-type: none"> -Descarga contínua do condensado, sendo ideais onde haja necessidade de imediata eliminação do condensado; -Únicos que possibilitam a eliminação de vapor preso; -Bons eliminadores de ar; -Absorvem quaisquer variações de pressão e/ou vazão; -Podem sofrer danos por golpes de aríete e condensado corrosivo.

Quadro 3. Principais tipos de purgadores e suas características de operação.

Fonte: Spirax Sarco (2005); IBP (1975); Telles (1999); U.S. Department of Energy (2000); Palacios (2010).

6.7.1 Métodos de Avaliação de Purgadores

Sistemas de vapor que não tiveram manutenção regular em um período de 3 a 5 anos, apresentam entre 15 a 30% dos purgadores instalados com algum tipo de falha, permitindo a saída de vapor vivo nas linhas de retorno de condensado. Em sistemas com programa de manutenção regular, purgadores com falhas

representam menos de 5% de todos os purgadores instalados. Se o sistema de distribuição tem instalado mais que 500 purgadores, uma avaliação irá revelar perdas significativas de vapor (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 1999).

Um programa regular de manutenção deve reduzir a probabilidade de falhas inesperadas, e um plano de manutenção deve incluir os purgadores e os filtros, que podem entupir. A frequência da avaliação depende do processo, porém 6 meses é um período razoável (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 1999). A Figura 24 mostra como se comporta as perdas de vapor em um purgador aberto direto para diferentes valores de diâmetro e pressão. Um furo de 3 mm de diâmetro pode descarregar 30 kg/h a uma pressão de 7,0 barg (SPIRAX SARCO, 2012a)

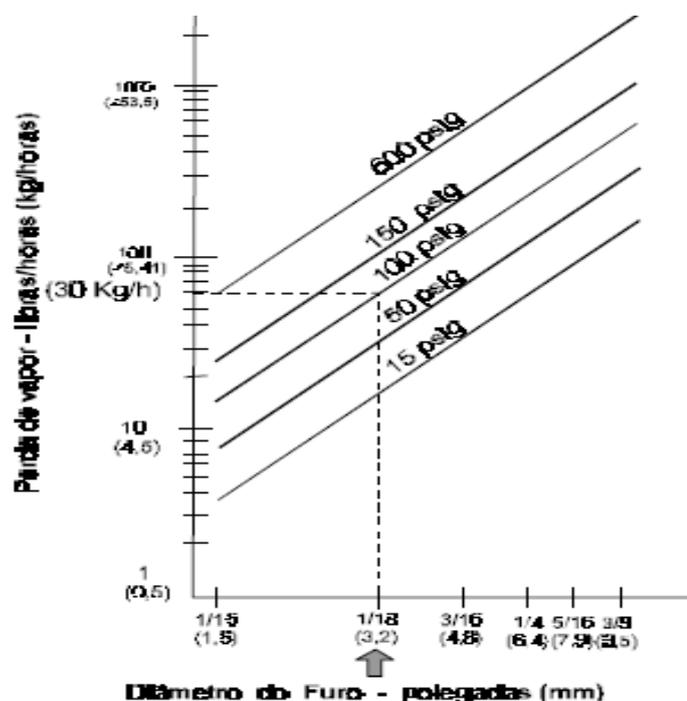


Figura 24. Perda de vapor por vazamento em purgadores.

Fonte: Spirax Sarco (2012a).

Existem quatro métodos de inspeção de purgadores de vapor: visual, acústico, eletrônico e térmico. O método visual consiste basicamente na observação da descarga dos purgadores para atmosfera quando existe recuperação de condensado. O observador deve saber identificar a diferença entre vapor flash e

vapor vivo já que a falha ocorre apenas quando há descarga de vapor vivo (PALACIOS, 2010). A Figura 25 mostra a diferença entre os dois tipos de vapor.

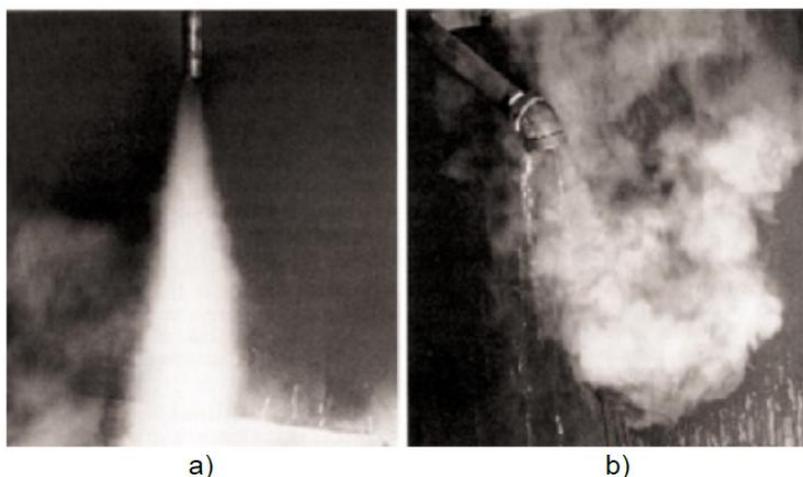


Figura 25. Diferença entre vapor vivo (a) e vapor flash (b) na descarga do purgador.

Fonte: Palacios (2010).

A detecção de vazamento através do método acústico consiste na verificação das condições sonoras produzidas pela passagem do vapor pelo orifício de descarga de um purgador. Esse método é ideal em descargas intermitentes, onde as condições sonoras entre o funcionamento normal e a condição falha são muito diferentes. Já em descargas contínuas há necessidade de uma interpretação correta dos sinais captados pelo detector ultrassônico para que não haja confusão entre a passagem de vapor vivo e vapor reevaporado, requerendo experiência do operador (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

O método eletrônico envolve o uso de sensores eletrônicos que detectam a presença de condensado através do princípio de condutividade elétrica em uma câmara que está instalada antes do purgador de vapor. Caso o purgador esteja perdendo vapor, ocorre um desequilíbrio das pressões na câmara, fazendo com que o sensor detecte a presença de vapor (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

A medição de temperatura para avaliações de purgadores é o método menos confiável já que o condensado e o vapor apresentam temperaturas próximas, tornando difícil a avaliação da operação do purgador (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

6.8 SEPARADORES DE UMIDADE

Separadores de umidade são utilizados para remover gotículas de água suspensas no vapor. Vapor úmido é vapor contendo certo grau de água, e é uma das principais preocupações em qualquer sistema de vapor. Ele pode reduzir a produtividade da planta diminuindo as taxas de transferência de calor, além de causar danos através de golpes de aríete e corrosão à maioria dos itens das instalações e equipamentos. Embora a drenagem e a purga eficiente possam remover a maioria da água, não irão eliminar as gotículas de água suspensas no vapor. Para remover essas gotículas e garantir que o vapor irá chegar seco aos equipamentos e operações de aquecimento, os separadores de umidade são instalados (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000; SPIRAX SARCO, 2005).

O princípio básico de funcionamento deste acessório é determinado pela brusca redução de velocidade, no seu interior, alterando também de forma brusca sua energia cinética. Para concretizar a eficiência do processo, existe no interior do separador, placas defletoras formando chicanas, e assim, pela diferença de densidade e a redução da energia cinética, as partículas de água são retidas e purgadas (SPIRAX SARCO, 2011). A Figura 26 apresenta um separador de umidade.

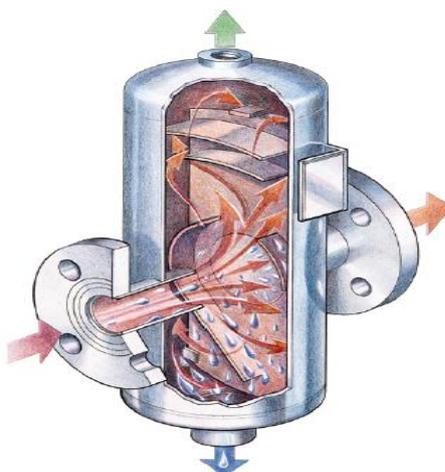


Figura 26. Separador de umidade.

Fonte: Spirax Sarco (2004).

O arraste de água da caldeira é um dos principais agentes que causam a diminuição do título do vapor, por esse motivo é ideal a instalação de um separador de umidade após a saída da caldeira. Deve-se instalar também na entrada de vapor de equipamentos que necessitam de vapor mais seco e antes de válvulas redutoras ou de controle (SPIRAX SARCO, 2005; RODRIGUES, 2012).

6.9 PRESENÇA DE AR

A Lei de Dalton enuncia que se tipos diferentes de gás forem misturados, a pressão total da mistura de gás será igual à soma das pressões parciais de cada tipo de gás. Assim, se tivermos ar nas linhas a pressão total será correspondente a pressão da mistura ar e vapor e não somente a pressão do vapor. É sabido que a energia disponível para transferência de calor provém do vapor, logo se o ar estiver presente ocupando o espaço do vapor, a pressão lida no manômetro pode fazer com que se espere que a temperatura corresponda à pressão de saturação, mas a pressão real do vapor estará abaixo e a temperatura nunca aumentará até o valor esperado (SPIRAX SARCO, 2005).

O ar é utilizado como um isolante de calor, pois o conduz precariamente. Por esse motivo os materiais isolantes mais confiáveis e efetivos são constituídos por uma massa de células de ar diminutas reunidas mediante fibras não condutoras de calor. Assim, caso o ar não seja eliminado das linhas poderá formar uma barreira às transferências de calor, gerando no processo pontos frios indesejáveis que poderão levar a queda de produtividade da planta (SPIRAX SARCO, 2011).

Este isolante térmico se acumula principalmente nos pontos altos das instalações e equipamentos e nos finais de linha, formando bolsões. Nesses pontos deve-se instalar um eliminador de ar, como mostra a Figura 27. Alguns purgadores são ótimos eliminadores de ar, porém só irão remover o ar que chegar até eles (SPIRAX SARCO, 2012a; ELETROBRAS, 2005b). Além disso, deve haver saídas de ar dentro da parte baixa do purgador, do lado oposto ao nível alto de entrada de vapor, no lado oposto ao nível baixo de entrada de vapor e no lado oposto ao final da entrada de vapor, como mostra a Figura 28.

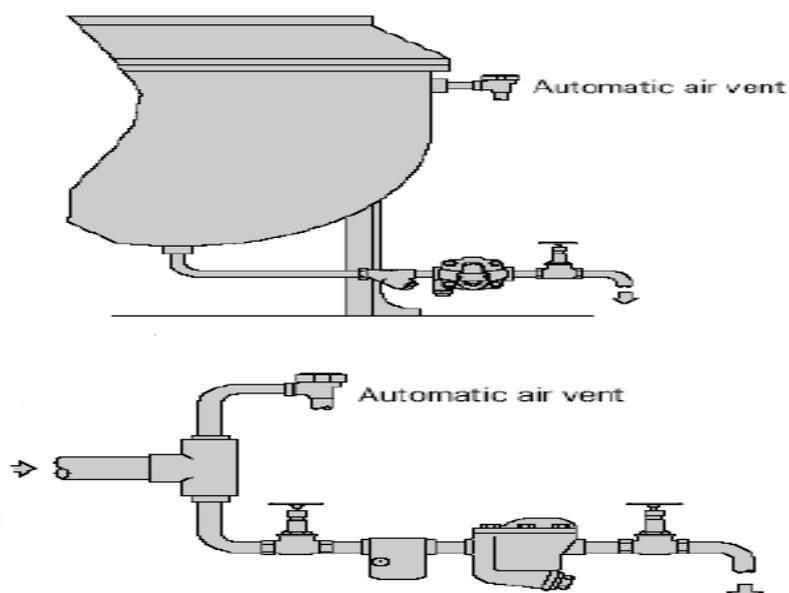


Figura 27. Pontos de instalação do eliminador de ar.
Fonte: Spirax Sarco (2011).

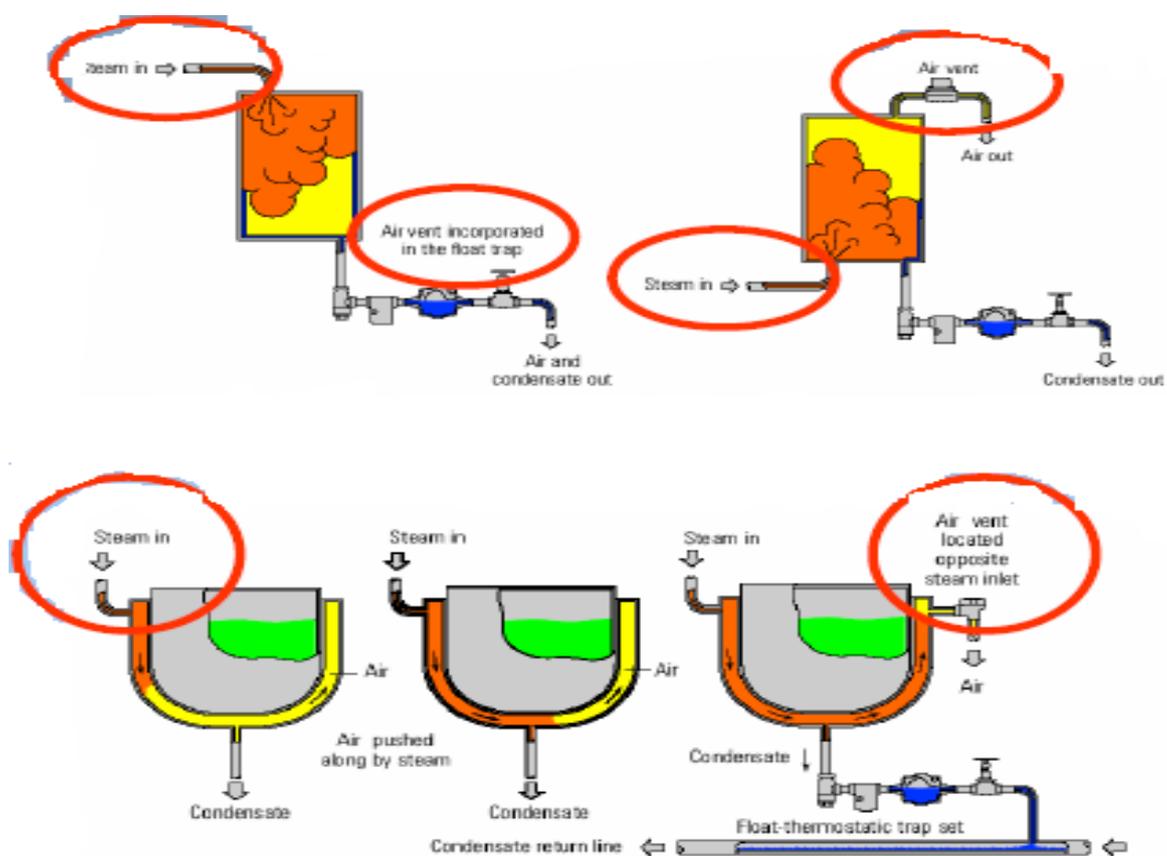


Figura 28. Localização dos pontos de saída de ar.
Fonte: Spirax Sarco (2011).

Antes da partida do sistema de vapor o ar deve ser removido. As saídas são geralmente dispositivos termostáticos, semelhantes aos purgadores termostáticos que dependem da diferença de temperatura entre o ar e vapor. Quando exposta ao ar de baixa temperatura no lado do sistema, a ventilação é aberta. À medida que o vapor de alta temperatura atinge a abertura, ela é fechada, prevenindo o escape de vapor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

6.10 VAZAMENTOS

Vazamentos de vapor são geralmente ignorados e como resultado geram custos operacionais desnecessariamente elevados. Os vazamentos são inevitáveis devido a rotina de desgaste de tubos e válvulas, além de diversos outros equipamentos e acessórios, resultantes às altas pressões e temperatura que o vapor é utilizado. Estes vazamentos fazem parte dos custos operacionais, porém, não são facilmente visíveis e podem reduzir a eficiência da distribuição de vapor. Assim, procurar formas de reduzir vazamentos é interessante para reduzir os custos, que por sua vez, contribuem para maiores lucros (DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND DEVELOPMENT PLANNING, 2006).

Um pequeno vazamento pode representar perdas energéticas anuais significativas tornando muito mais caro mantê-lo do que consertá-lo. Assim, consertar um vazamento de vapor é uma maneira fácil e de custo baixo para diminuir custos operacionais e aumentar a eficiência energética. Os benefícios incorporados ao consertá-los são (SPIRAX SARCO, 2012b; DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND DEVELOPMENT PLANNING, 2006):

- Um aumento de 3-5% de eficiência no sistema de vapor, que por sua vez significa uma redução nos custos operacionais;
- Com o reparo em geral tem-se um *payback* curto de dois meses ou menos;
- Ajuda na preservação do isolamento térmico existente de tubos e válvulas;
- Economia de até 34% no custo do vapor.

A Figura 29 ilustra a taxa de perda de vapor devido vazamentos de diferentes diâmetros em diferentes pressões. Esta perda pode ser prontamente traduzida em uma economia de combustível com base nas horas anuais de operação.

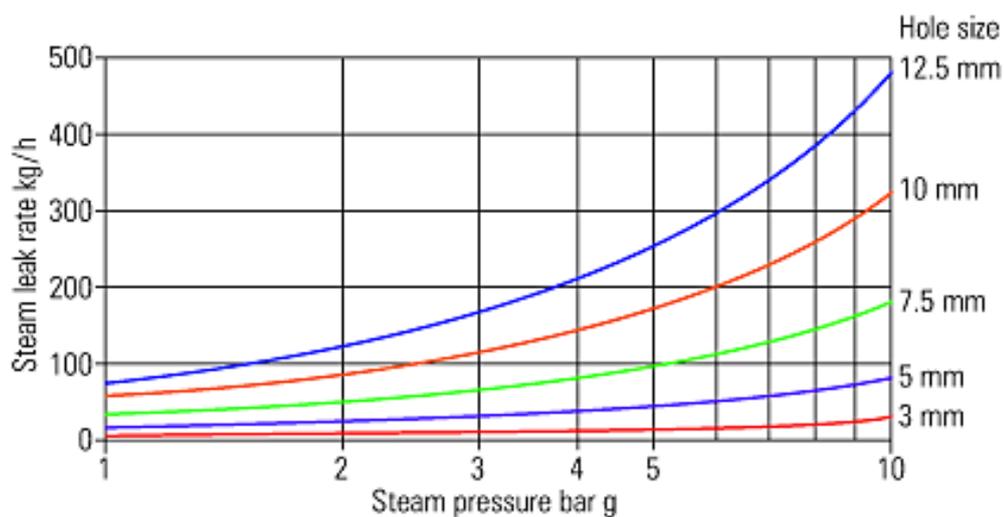


Figura 29. Taxa de perda de vapor em relação a pressão e o tamanho do vazamento.

Fonte: Spirax Sarco (2012b).

7 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR

O vapor saturado, agente de conteúdo energético, pode ser utilizado como fonte de calor para processos de aquecimento e secagem. Ao ceder sua energia térmica sob taxas elevadas por unidade de massa, o vapor condensa encerrando seu ciclo dentro do sistema de vapor (PALACIOS, 2010).

A otimização na utilização de vapor depende de vários fatores. Os equipamentos do processo devem operar em condições ótimas de pressão e temperatura, para isso é importante que o vapor esteja sendo entregue dentro dos parâmetros considerados ideais para cada ponto de uso, fornecendo calor em condições controladas e limpas. A automatização do processo pode ajudar consideravelmente no controle dos parâmetros de operação. A limpeza de superfícies de troca térmica, uma baixa perda de calor para o ambiente, a drenagem eficiente do condensado e a constante retirada do ar e gases incondensáveis, garantem a eficiência energética na utilização do vapor (RODRIGUES, 2012; ELETROBRAS, 2005b).

7.1 REDUÇÃO DE PRESSÃO

Os geradores de vapor são projetados para produzir vapor a altas pressões, uma vez que a pressões mais baixas a eficiência do processo diminui e pode ocorrer o arraste de água. Além do aumento da capacidade de armazenamento térmico da caldeira com geração de vapor a altas pressões, é possível também utilização de tubulações de diâmetro menor na linha principal. Como foi dito, o volume específico do vapor diminui à medida que a pressão aumenta (SPIRAX SARCO, 2005).

Equipamentos que utilizam vapor, possuem entre os parâmetros de projeto uma pressão máxima de trabalho admitida. Geralmente é menor que a pressão de geração. Apesar da perda de pressão do vapor no percurso da distribuição, é necessária a instalação de válvulas redutoras de pressão antes dos pontos de uso (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

A utilização de vapor a pressões mais baixas também proporciona vantagens econômicas, já que, vapor à baixas pressões tem um maior calor latente, isto é, cada unidade de massa de vapor contém mais energia. Assim, utilizando baixas pressões nos pontos de uso é possível reduzir a quantidade de combustível consumido, considerando que a mesma quantidade de combustível fornecerá mais energia (RODRIGUES, 2012; PALÁCIOS, 2010).

7.2 CONTROLES DE PROCESSO

Atualmente, todos os sistemas de vapor necessitam de algum tipo de instrumentação e controle automático que possibilite que as variáveis de processo se mantenham dentro de determinados limites pré-programados para atender à demanda de vapor e operar com segurança garantida (ELETROBRAS, 2005b).

É através da instrumentação, fazendo um controle rigoroso nas variáveis existentes em um processo, que é garantido à qualidade do produto, a produtividade, como também, a segurança do equipamento e do operador (CASTELETTI, 2009).

O sistema de vapor deve possuir instrumentos de medição que tornem possível o controle das principais variáveis do processo como pressão, temperatura, vazão, nível, ou outras grandezas, dependendo da necessidade de cada operação ou equipamento. As medidas coletadas de maior importância para o vapor são temperatura e pressão, devendo ser monitoradas constantemente para garantir o correto funcionamento do sistema de vapor.

A temperatura do vapor saturado varia com a pressão. Na prática, o controle da pressão é um método preciso e eficaz de controlar o processo (SPIRAX SARCO, 2004). Logo, uma redução da pressão do vapor vem acompanhada de um decréscimo da temperatura.

Uma forma de regular a pressão é estrangulando o fluxo de vapor. Isto pode ser feito mediante a instalação de uma válvula de controle termostática que pode ser calibrada para atender inúmeras faixas de temperatura. Este tipo de controle é chamado de modulante porque a demanda de vapor aumenta ou diminui gradualmente, respondendo as variações de temperatura do equipamento. Assim,

pode-se utilizar somente o vapor necessário para manter a temperatura desejada para determinado processo mantendo sua estabilidade (SPIRAX SARCO, 2004; RODRIGUES, 2012).

O controle de temperatura do processo proporciona benefícios econômicos e de produtividade. Por exemplo, se um determinado processo estiver com a temperatura variando 10 °C, o vapor necessário para cobrir essa variação será de aproximadamente 142,6 kg/h, se essa variação for de 2 °C, o vapor necessário será de 28,52 kg/h, ou seja, um ganho expressivo (RODRIGUES, 2012).

7.3 ÁREAS DE TROCA TÉRMICA

No item 7.3 foi mostrado como o acúmulo de água, resultante da condensação do vapor, pode afetar o fluxo de calor ocupando as áreas de troca térmica. Além do condensado, outros obstáculos impedem a transferência de calor do vapor para o meio que se deseja aquecer. O que ocorre na prática é ilustrado na Figura 30.

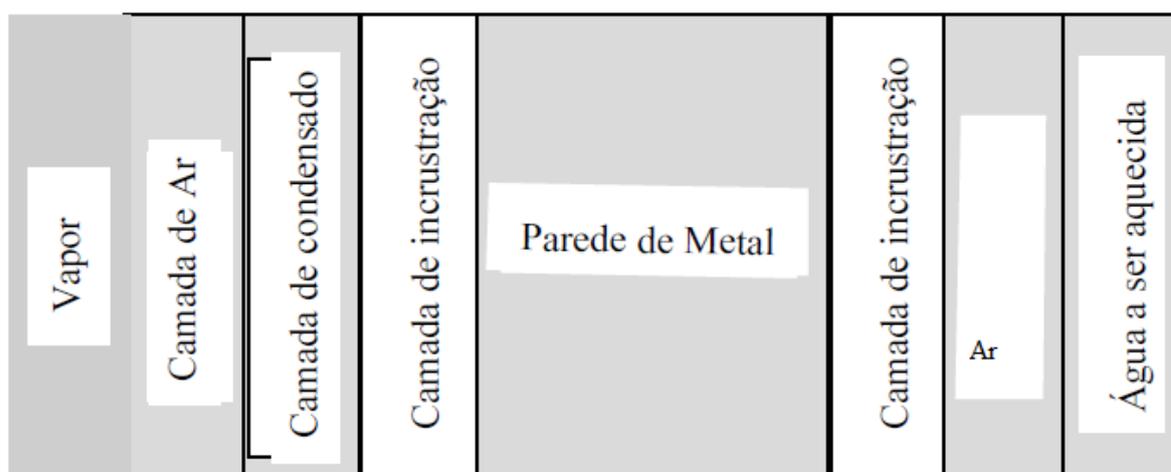


Figura 30. Películas que reduzem a eficiência da transferência de calor do vapor.

Fonte: Spirax Sarco (2005).

Filmes de água, ar e óxidos acumulam nas paredes metálicas e atuam como barreiras na troca térmica. Na parede do tubo em contato com o produto pode ocorrer formação uma película de produto estagnado, incrustações formadas pelo próprio produto e óxidos. A limpeza regular dessas paredes e a agitação contínua do produto podem eliminar essas barreiras. Na parede em contato com o vapor podem ficar depositados óxidos e incrustações e assim, deve-se também mantê-las limpas e livres. Outro fator de prevenção é a eficiência do sistema de tratamento de água da caldeira (SPIRAX SARCO, 2005).

Dentre as resistências a transferência de calor nas linhas de distribuição de vapor, o condensado e o ar são os mais prejudiciais. Uma película de água de 25 milímetros de espessura oferece a mesma resistência à transferência de calor que uma parede de ferro de 17 milímetros ou uma de cobre de 120 milímetros. Já uma película de ar de 1 mm de espessura pode oferecer a mesma resistência ao fluxo de calor que uma película de 25 milímetros de água, uma de ferro de 1500 milímetros ou de cobre de 12000 milímetros (SPIRAX SARCO, 2005).

7.4 ACUMULADOR DE VAPOR

Os picos repentinos de demanda de vapor que ocorrem na indústria podem provocar arraste de água das caldeiras, tornando o vapor que passa pelas linhas de distribuição, úmido. Além disso, quando o vapor é consumido intensamente em espaços curtos de tempo, pode gerar oscilações indesejáveis de pressão no sistema. Nestes casos as caldeiras devem funcionar a pressão máxima possível para proporcionar certo grau de armazenamento térmico e assim suportar a demanda. O armazenamento térmico pode ser maior, utilizando uma caldeira maior ou instalando um acumulador de vapor (SPIRAX SARCO, 2008).

O acumulador de vapor armazena energia térmica quando a demanda não é muito alta e aumenta o fluxo de vapor nos picos bruscos de demanda. Este sistema protege a caldeira dos efeitos de uma demanda excessiva, permitindo que as linhas de distribuição entreguem vapor normalmente e que as elevadas exigências que possam surgir, sejam cumpridas (SPIRAX SARCO, 2008).

O acumulador de vapor é um vaso de pressão, parcialmente cheio com água quente (líquido saturado), que permite o funcionamento da caldeira com uma saída constante igual à demanda média de vapor. Estes equipamentos são pressurizados a pressão de operação da caldeira e apresentam um volume de água que se encontra a pressão e temperatura de geração (MOHD; MUSTAFA; NORR, 2009; RODRIGUES; 2012). Quando a alimentação de vapor é superior à procura, o vapor de alta pressão em excesso é carregado para dentro do acumulador através de injetores especiais. O vapor é condensado, fornecendo o seu calor latente, para aumentar a pressão, a temperatura e o teor de calor do corpo da água. Quando a demanda de vapor excede o fornecimento, a pressão no acumulador cai e a água saturada gera vapor flash levando de volta o calor armazenado anteriormente. Um sistema de válvulas de controle regulam a carga e descarga (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

No entanto, quando o consumo de vapor de uma indústria é relativamente constante e não há picos de demanda, o acumulador de vapor não é necessário (SPIRAX SARCO, 2008). O vapor armazenado no acumulador está prontamente disponível para os consumidores, e pode ser usado para suprir os vários tipos de demanda de vapor. Por períodos curtos, o acumulador pode descarregar o vapor em taxas muito elevadas, reduzindo o tamanho da caldeira necessária para suprir a carga de trabalho (MOHD; MUSTAFA; NORR, 2009).

7.5 INJEÇÃO DIRETA DE VAPOR

Existem dois tipos básicos de trocadores utilizados para transferir calor entre os fluidos de processo – diretos e indiretos (PERRY, 1998). Geralmente, trocadores de calor de contato indireto apresentam dois ou mais caminhos de fluxo de fluidos e não permitem a mistura direta deles. Eles promovem a transferência de calor de um fluido para o outro através de uma barreira térmica, como a parede de um tubo ou uma placa. Já os trocadores de contato direto transferem calor injetando quantidades precisamente definidas de vapor para o fluido de processo que tem de ser aquecido (SCHROYER, 1997).

O trocador de injeção direta, apresentado na Figura 31, funciona com vapor de alta pressão. À medida que o vapor passa através do trocador, a pressão cai e a velocidade aumenta. A corrente de alta velocidade de vapor é posta em contato com o fluido a ser aquecido. O arrastamento do fluido ocorre à medida que o jato de vapor transfere energia para o fluido. O fluxo avança através do trocador e mistura as duas correntes, resultando em velocidade uniforme. À medida que ocorre a mistura de fluxos, o vapor condensa e o líquido absorve o calor, bem como a energia cinética do jato de vapor. Todo o vapor é condensado na corrente de líquido antes da mistura sair do trocador, passando então para a tubulação de processo (KADANT, 2010).

A injeção direta de vapor nos fluidos de processo resulta em transferência de calor mais rápida e uso de energia mais eficiente do que com trocadores de calor indiretos. O contato direto do vapor pode fornecer 100% de eficiência térmica porque tanto o calor sensível quanto o calor latente do vapor são utilizados no aquecimento. A economia de energia pode ser considerável – reduções na faixa de 20-25% são comuns (SCHROYER, 1997; KADANT; 2010).

Os benefícios adicionais com o aquecimento de contato direto estão relacionados com layout da indústria e a manutenção. O sistema de injeção de vapor de contato direto geralmente necessita de menos espaço do que os outros métodos de transferência de calor, e também elimina a necessidade de sistemas de retorno de condensado, que são muitas vezes necessários para trocadores de calor indiretos. Além disso, os custos de manutenção podem ser significativamente menores do que as de outros sistemas de aquecimento. Uma das desvantagens é a diluição do produto líquido, pelo condensado incorporado, além do risco de contaminação do produto por algum resíduo contido no vapor (SCHROYER, 1997; KADANT; 2010).

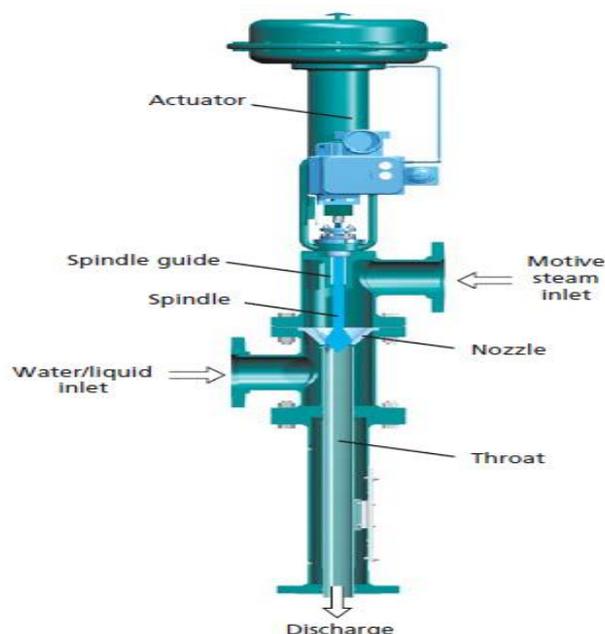


Figura 31. Trocador de calor de injeção direta de vapor.

Fonte: Kadant 2010.

7.6 EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

Equipamentos utilizados no uso final de sistemas de vapor convertem calor em outras formas de energia útil. Entre os equipamentos comuns de uso final incluem dispositivos de troca de calor para transferir energia térmica e turbinas para produzir energia mecânica. Nas indústrias, o vapor é utilizado para dar suporte direto à produção, fazendo com que seu desempenho e confiabilidade sejam essenciais para garantir a produtividade. É possível obter melhorias na eficiência dos pontos de uso final através de estudos para determinar suas condições e parâmetros ótimos de operação. Além disso, a manutenção frequente dos equipamentos também tende a resultar em melhor desempenho e confiabilidade (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; SPIRAX SARCO, 2011; RODRIGUES, 2012).

Existe uma vasta gama de equipamentos de utilização final, em grande parte devido às vantagens do vapor como fonte de energia, que foram relatados nos primeiros capítulos. A seguir, é apresentado de forma resumida alguns dos principais equipamentos utilizados no uso final de vapor.

7.6.1 Secadores

Secadores são utilizados para reduzir ou eliminar a quantidade de água de materiais e outras substâncias do processo. Os processos de secagem podem ser classificados de acordo com as condições físicas utilizadas para adicionar calor e extrair a água, podendo ser de forma direta ou indireta (GEANKOPLIS, 1998). Quando a secagem ocorre com adição de calor de forma direta, ela é feita com gases quentes aquecidos com vapor ou gases residuais de combustão. Na secagem indireta a umidade é removida termicamente e a fonte de energia pode ser vapor, gases residuais de combustão ou fluido de processo à altas temperaturas. Tipos comuns de secador indiretos são tipo bobina e tambor rotativo (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1999).

7.6.2 Evaporadores

Evaporadores reduzem o teor de água de um líquido ou solução a fim de concentrar um produto através da ebulição. O processo se dá por aquecimento, geralmente utilizando vapor como fonte de energia (GEANKOPLIS, 1998).

Os evaporadores podem ser de efeito único ou de múltiplos efeitos. Um sistema de evaporadores de múltiplo efeito pode ser entendido utilizando o evaporador filme descendente, que é o mais utilizado na indústria de alimentos (VALENTAS; ROTSTEIN; SINGH, 1997). Neste evaporador o líquido é introduzido no topo e desce, por gravidade, escoando sobre a área de transferência de calor. O vapor e o líquido são separados. O líquido segue para o próximo estágio e vapor é utilizado como fonte de energia no próximo estágio, compondo assim um sistema de múltiplo efeito, proporcionando aumento da eficiência energética do sistema (GEANKOPLIS, 1998).

7.6.3 Trocadores de Calor

O aquecimento ou resfriamento de materiais ou fluidos de processo geralmente é realizado utilizando um trocador de calor. Existe uma grande variedade de trocadores, para determinar o tipo ideal para cada aplicação é necessário ser feito um estudo prévio. A determinação do tamanho também é importante, já que a área de transferência de calor do trocador afeta diretamente sua eficiência e custo inicial (WANG, 2008).

No trocador de calor existem duas correntes ou mais de fluidos a diferentes temperaturas. Esses fluidos são separados geralmente por uma parede, e a transferência de calor se dá do fluido de um lado da parede para o fluido do outro lado (WANG, 2008; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). Devido aos benefícios do uso de vapor, ele é geralmente utilizado como fonte de calor nos trocadores.

Os trocadores desempenham papel fundamental na recuperação de calor. Alguns dos tipos básicos de trocadores incluem (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; WANG, 2008):

- Tubular: São compostos de feixes de tubos que são cercados por calor ou pelo fluido aquecido. Nesta categoria está incluído o trocador duplo tubo e o casco e tubo, apresentado na Figura 32. Trocadores duplo tubo são utilizados para aquecer ar utilizado em secagem e para aplicações de aquecimento ambiente. Trocadores casco e tubo são muitas vezes utilizados para fins de aquecimento e evaporação de líquido. Esta categoria de trocadores são utilizados em elevadas temperaturas e sob alta pressão.

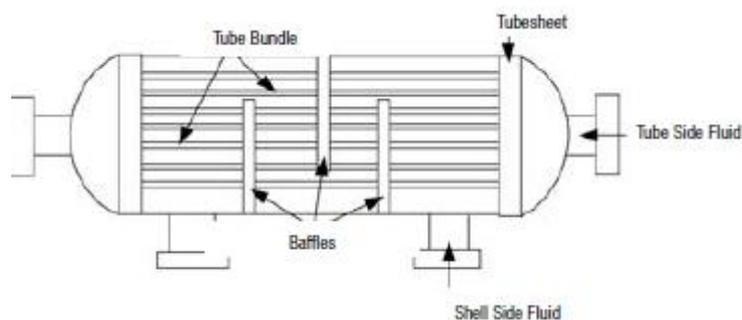


Figura 32. Trocador de calor casco e tubo.

Fonte: U.S. Department of Energy (2000).

- Placas: Consiste de um suporte, onde placas independentes de metal, sustentadas por barras, são presas por compressão, entre uma extremidade móvel e outra fixa. Entre placas adjacentes formam-se canais por onde os fluidos escoam como mostra a Figura 33. Sempre surgem comparações entre os trocadores casco e tubo. O trocador de placas é viável somente se a pressão de operação for menor que 30 bar e as temperaturas forem inferiores a 180 °C (juntas normais) ou 260 °C (juntas de amianto).

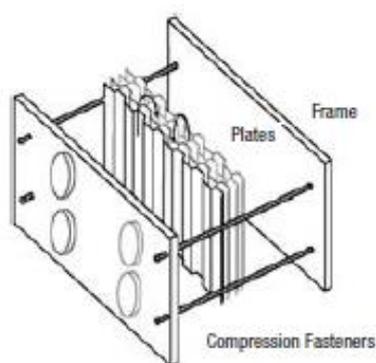


Figura 33. Trocador de calor de placas.

Fonte: U.S. Department of Energy (2000).

- Encamisado: Trocadores de calor encamisados utilizam um invólucro para envolver o recipiente que contém o produto que se quer aquecer.

Na Figura 34 é mostrado um trocador encamisado. Estes trocadores são indicados para processos e produtos que tendem a sujar ou obstruir feixes de tubos. O produto fica livre para manuseio e as áreas preenchidas com vapor ficam no costado do equipamento.

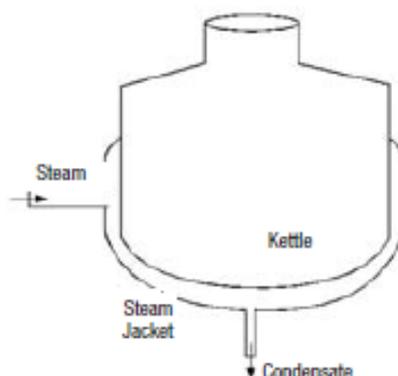


Figura 34. Trocador de calor tipo vaso encamisado.

Fonte: U.S. Department of Energy (2000).

7.6.4 Termocompressores

Termocompressores combinam vapor de alta pressão e de baixa pressão para formar vapor de pressão intermediária para ser utilizado no processo (Figura 35). Muitas vezes, o vapor de baixa pressão não tem energia suficiente para utilização, no entanto, descarrega-lo para o sistema de retorno de condensado pode ser uma perda de energia desnecessária. Termocompressores utilizam uma fonte de vapor de alta pressão para recuperar a energia da fonte de baixa pressão, proporcionando um suprimento de vapor de conteúdo energético intermediário que pode ser utilizado como fonte viável de energia (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; IBARZ; BARBOSA-CASANOVAS, 2003).

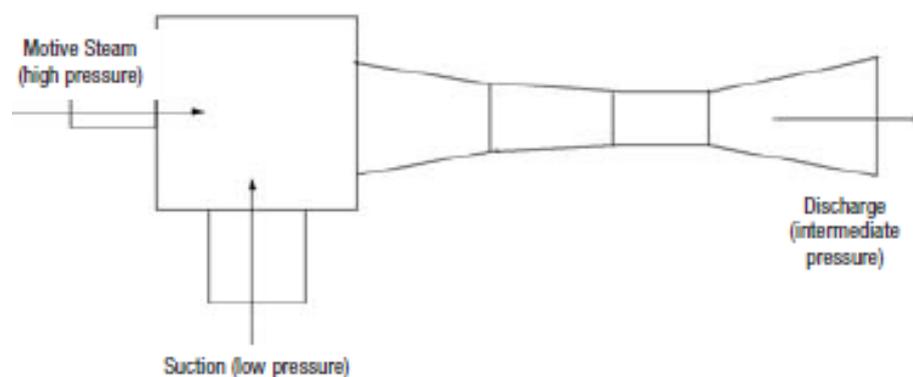


Figura 35. Operação de um termocompressor.

Fonte: U. S. Department of Energy (2000).

7.6.5 Traceamento

O traceamento de vapor é utilizado para manter a temperatura de um fluido dentro de uma tubulação. São tubulações de ½" de vapor que são montadas na parte inferior das tubulações do fluido que se quer manter a temperatura, isoladas juntas. A Figura 36 apresenta o esquema de montagem das linhas traceadas (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; RODRIGUES, 2012).

O traceamento de vapor é a distribuição de vapor através de tubos de diâmetro pequeno, ou seja, os tubos transferem calor para um tubo maior para evitar que os fluidos de processo não se tornem mais viscosos, solidifiquem ou congelem, dificultando o escoamento (SPIRAX SARCO, 2004).

Uma aplicação comum de linhas de traceamento é evitar o congelamento de um fluido de processo na tubulação que corre fora da área de controle de temperatura. Uma vez que as linhas traceadas estão expostas a condições de congelamento, o isolamento adequado, o fluxo de vapor e a drenagem de condensado são essenciais para evitar o congelamento das linhas traceadas e a tubulação de processo (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

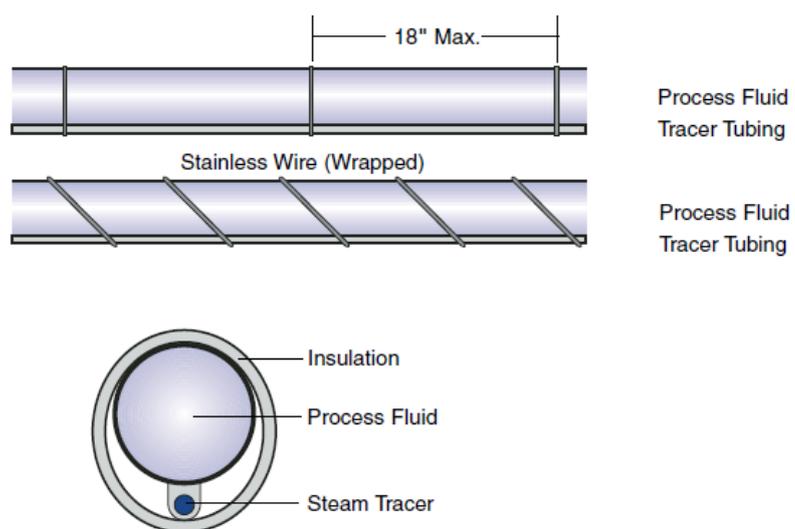


Figura 36. Esquema de instalação do traceamento.

Fonte: Spirax Sarco (2004).

8 OPORTUNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO RETORNO DO CONDENSADO

Subproduto do sistema de vapor, o condensado se forma no sistema devido às perdas térmicas nas linhas de distribuição e nos equipamentos onde ocorre transferência de calor (BARRIGA, 2012). O condensado é água destilada, tratada e retém energia do calor sensível (PALACIOS, 2010). Um sistema de vapor eficiente deve recuperar cada gota de condensado e envia-lo para o desaerador ou tanque de alimentação da caldeira, ou ainda utiliza-lo no processo (SPIRAX SARCO, 2004).

Aproximadamente 25% do calor utilizado para gerar vapor permanece no condensado quando vapor fornece calor ao processo (SPIRAX SARCO, 2004). Além do conteúdo energético, o condensado pode ser reutilizado na alimentação da caldeira, dessa forma economizando em tratamento químico e reduzindo o volume de efluentes (SPIRAX SARCO, 2012b).

O sistema de recuperação de condensado requer tubulações, reservatórios de captação, bombas, e em muitos casos, os tanques de vapor flash e filtros. A redução de custos com tratamento químico e aquecimento da água de alimentação, muitas vezes fazem os investimentos em sistemas de recuperação de condensação extremamente viáveis (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). A recuperação de condensado pode reduzir de 20 a 25% os custos de geração de um sistema de vapor (PALACIOS, 2010; SPIRAX SARCO, 2006).

8.1 GERENCIAMENTO DO CONDENSADO RESIDUAL

Da mesma forma que é importante assegurar que o sistema de distribuição de vapor seja eficaz e que os pontos de uso estejam operando de forma efetiva, em condições ótimas de pressão e temperatura, a recuperação do condensado é também fundamental para garantir o desempenho eficiente e sustentável do sistema.

Como foi dito nos capítulos anteriores, a eficiência máxima de um sistema de vapor somente é alcançada com a drenagem efetiva de todo condensado

formado. Por isso é preciso instalar um purgador na posição mais adequada para a aplicação em questão. Além disso, o aproveitamento do vapor flash é importante para racionalização dos insumos energéticos. Porém, temos ainda o manejo do condensado residual.

O condensado residual deve retornar para caldeira por diversas razões. Uma delas é que mesmo após o aproveitamento do vapor flash, uma parte do calor se mantém no condensado. É possível considerar sua utilização como água quente no processo. Porém geralmente, a melhor solução é devolvê-lo ao tanque de alimentação da caldeira (SPIRAX SARCO, 2004).

À medida que mais condensado retorna, menos água de reposição é necessária, incorporando benefícios econômicos com menor consumo de combustível, água de reposição e produtos para tratamento químico e de efluentes.

Além disso, o retorno de condensado de elevada pureza reduz as perdas de energia devido à diminuição das descargas de fundo e de superfície das caldeiras (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

A única razão justificável para não retornar condensado é o risco de contaminação. Serpentinhas perfuradas em tanques de processo e trocadores de calor podem ocasionar contaminação cruzada entre fluidos de processo e o condensado. Se há qualquer possibilidade do condensado estar contaminado, ele não deve ser devolvido para a caldeira. Este problema é resolvido com a aplicação de sistemas de detecção e monitoramento da qualidade de condensado em diferentes áreas do processo, e adequação de um meio de redirecionar o condensado contaminado (SPIRAX SARCO, 2000).

8.2 LINHAS DE RETORNO

As linhas de retorno transportam condensado proveniente dos pontos de drenagem da distribuição e dos equipamentos de uso final para o tanque de alimentação da caldeira. Estas tubulações devem ser adequadamente dimensionadas e isoladas, e ainda deve-se considerar nos cálculos de projeto, o vapor flash que pode se formar no percurso. A instalação de diâmetros de tubulação maiores encarece os custos, porém cria menor queda de pressão para uma dada

taxa de fluxo, o que reduz a carga sobre as bombas de condensado. Diâmetros maiores reduzem também o ruído associado com o fluxo de condensado e são mais adequados para o transporte de vapor flash (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; SPIRAX SARCO, 2004).

O isolamento das linhas de retorno ajuda a reter a energia térmica, que proporciona a maior parte dos benefícios de um sistema de recuperação de condensado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; SPIRAX SARCO, 2004).

Nas linhas de descarga dos purgadores deve ocorrer, não somente o transporte de condensado e ar, mas também gases incondensáveis e vapor flash liberado pelo condensado com a queda de pressão. Estas linhas devem ser inclinadas em 14 milímetros/metro no direcionamento de um tanque de recuperação de vapor reevaporado, coletor de uma bomba de condensado ou diretamente no tanque de alimentação da caldeira (SPIRAX SARCO, 2012a). A proporção gerada de vapor flash pode ser calculado através da equação (4), ou consultado em tabelas, como a Figura 37.

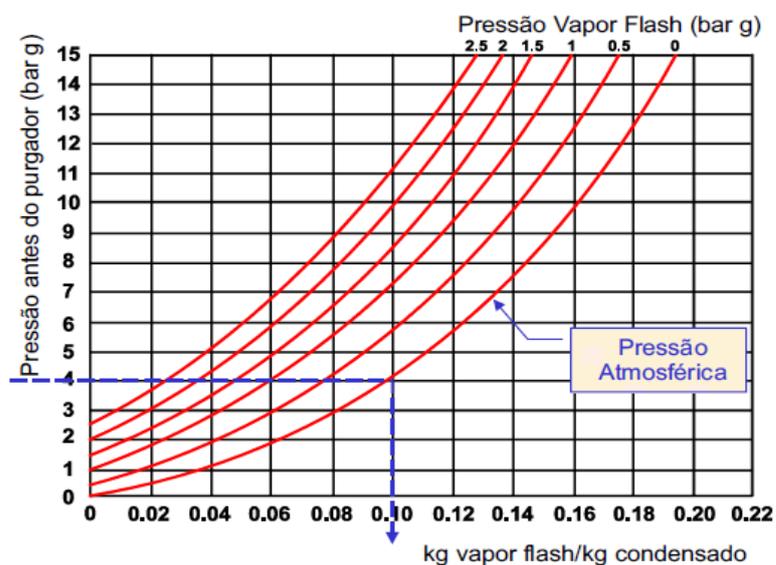


Figura 37. Formação de vapor flash.

Fonte: Spirax Sarco (2012b).

Para dimensionar corretamente as linhas de descarga é essencial saber a vazão do condensado e do vapor reevaporado que será liberado. O diâmetro ideal

para a linha de retorno pode ser encontrada através do gráfico apresentado na Figura 38. A porcentagem de vapor reevaporado pode ser encontrada na parte de cima do quadro, á esquerda, na intersecção das linhas da pressão a montante dos purgadores e pressão na linha de retorno (A). Deste ponto uma vertical é traçada para cortar a linha horizontal que representa a vazão do condensado estabelecido. Este ponto representa o peso do vapor reevaporado (B). De (B) nasce uma curva á direita que segue no sentido horizontal até encontrar a linha que mostra a pressão da linha de retorno (C). Este ponto representa o volume de vapor reevaporado e uma vertical de (C) que corta as linhas mostrando as velocidades das linhas de retorno e os diâmetros necessários da tubulação (D) (SPIRAX SARCO, 2012a).

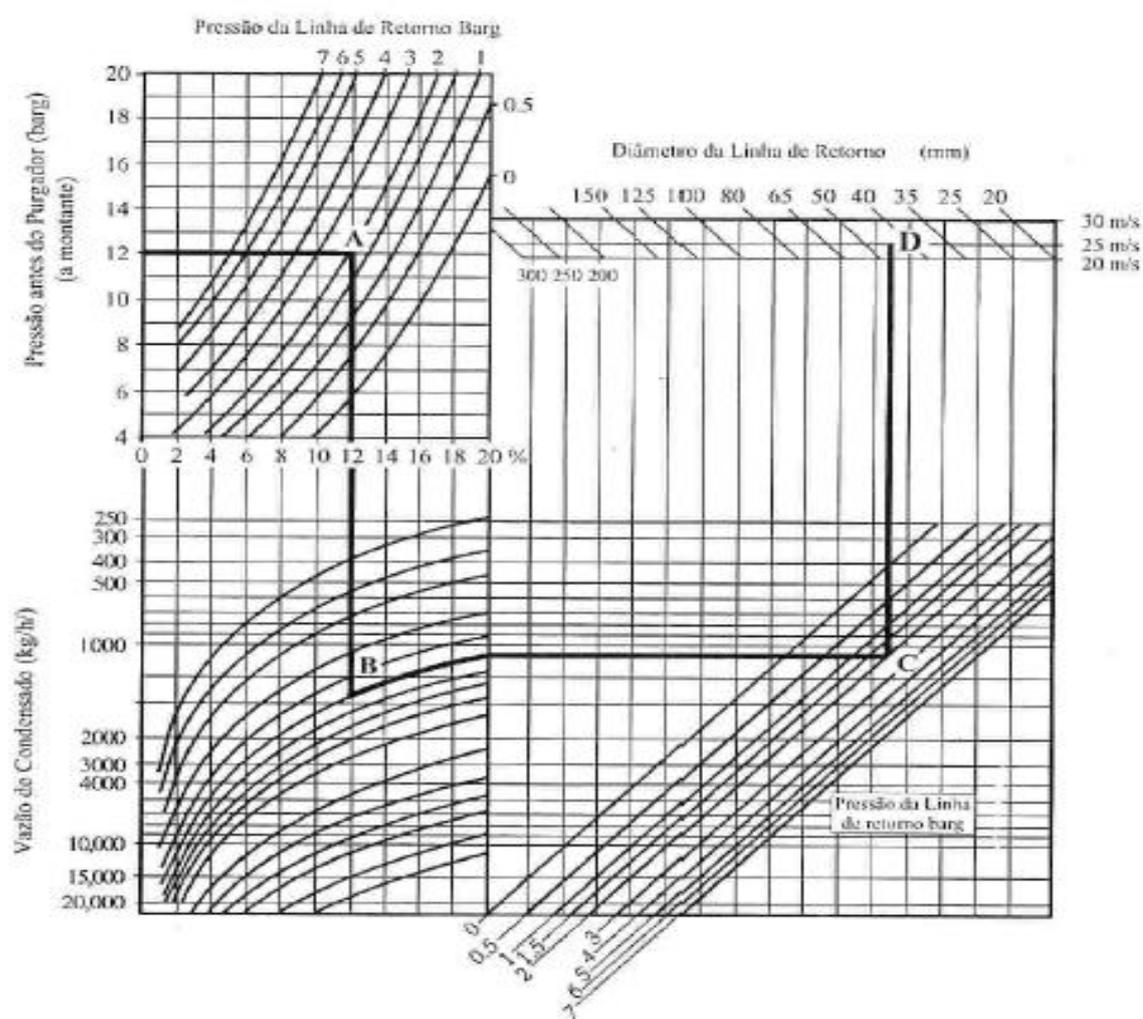


Figura 38. Gráfico para dimensionamento das linhas de retorno.

Fonte: Spirax Sarco (2012a).

8.3 RETORNO ALAGADO E POR GRAVIDADE

O retorno ideal é alcançando onde o condensado flui por gravidade com a utilização de uma queda do purgador até o tanque coletor. Quando o retorno é por cima, ou seja, após os purgadores a linha de retorno se eleva, é chamada alagada. Neste caso, toda tubulação fica alagada e o condensado exerce contra-pressão nos purgadores no mínimo a coluna correspondente (RODRIGUES, 2012). Por exemplo, com 20 m.c.a. a contra-pressão será de $2,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Com a tubulação inclinada e dimensionada corretamente é possível ligar a descarga de varios purgadores a linha de retorno sem que haja problemas. Porém, se a linha estiver alagada, o condensado e o vapor reevaporado devem ser levados a um coletor próximo para serem bombeados, como mostra a Figura 39. (SPIRAX SARCO, 2012a).

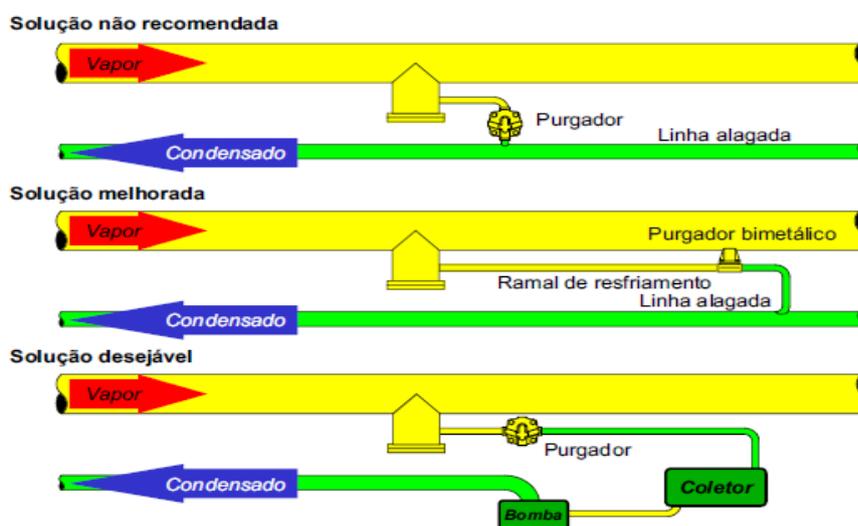


Figura 39. Linhas de retorno alagadas.

Fonte: Spirax Sarco (2012).

8.4 BOMBEAMENTO DO CONDENSADO

Geralmente é necessário bombear o condensado previamente acumulado em um tanque ou coletor para um ponto mais alto, como por exemplo, o tanque de alimentação da caldeira (SPIRAX SARCO, 2004). As bombas de condensado podem ter como fonte de energia eletricidade, vapor ou ar comprimido, em função da disponibilidade de tais fontes (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). O esquema de bombeamento pode ser visto na Figura 40.

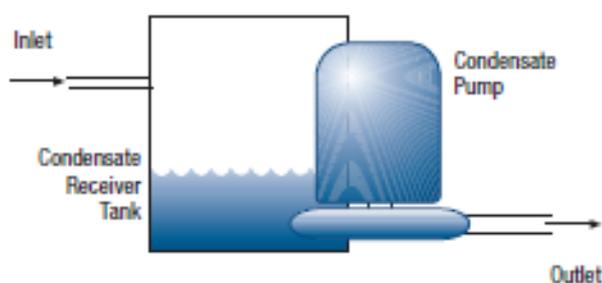


Figura 40. Esquema de instalação para bombeamento de condensado.

Fonte: U. S. Department of Energy (2000).

Bombas elétricas são geralmente do tipo centrífugas. Em muitos casos, os tanques coletores possuem um controle de nível que assegura que a bomba manterá o nível de condensado dentro de limites pré-estabelecidos, cortando a energia da bomba em condições de baixo nível de água (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). Ao utilizar este tipo de bomba deve ser considerada a resistência a altas temperaturas e pequenas colunas de alimentação. Normalmente elas não são projetadas para trabalhar nestas condições (SPIRAX SARCO, 2012a).

Bombas auto-operadas a vapor ou ar comprimido são utilizadas onde as bombas elétricas não seriam adequadas (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000). Instaladas de forma correta, operam por longos períodos sem registrar problemas. Não apresentam cavitação e podem bombear inclusive condensados em

ebulição. Por não possuírem motores, não são afetadas pela umidade (SPIRAX SARCO, 2004).

8.5 APROVEITAMENTO DE VAPOR FLASH

O condensado é descarregado através de purgadores de uma pressão superior para uma mais baixa. Como resultado desta redução de pressão, uma parte do condensado irá reevaporar, sendo chamado de vapor flash (SPIRAX SARCO, 2004). O condensado a baixa pressão tem um conteúdo energético menor que o condensado de alta pressão, esse calor em excesso causará reevaporação de parte do condensado, convertendo-se em vapor de pressão mais baixa. A recuperação do vapor flash pode ser um complemento em aplicações que possibilitem o uso de vapor a baixa pressão (SPIRAX SARCO, 2012b).

A proporção de condensado que vai evaporar varia de acordo com o nível de redução de pressão entre o lado do vapor (tubulação antes do purgador) e do lado do condensado (tubulação depois do purgador). Uma percentagem típica é de 10-15% em massa, como mostra a Figura 41 (SPIRAX SARCO, 2004). Quanto maior a vazão do condensado e sua pressão, maior será a vazão de formação de vapor flash. Por exemplo, uma redução de 10 kgf/cm² para 1 kgf/cm² irá formar cerca de 12,5% de reevaporado (RODRIGUES, 2012).

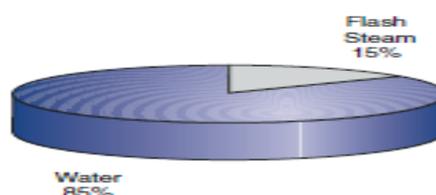


Figura 41. Quantidade de vapor flash formado com relação ao condensado.

Fonte: Spirax Sarco (2004).

Cerca de metade da energia contida no condensado, isto é, 12,5% do total da energia fornecida pelos combustíveis, pode ser perdida através do vapor flash,

como mostra a Figura 42 (SPIRAX SARCO, 2004). Em qualquer sistema onde se pretenda atingir eficiência máxima, o vapor reevaporado precisa ser separado e enviado para os tanques de recuperação de vapor flash para posterior aproveitamento (SPIRAX SARCO, 2012b). Cada quilo de vapor reevaporado aproveitado é um quilo que deixa de ser fornecido diretamente pela caldeira. Assim, fica claro a importância para redução de custos e sustentabilidade da planta, o aproveitamento desse resíduo.

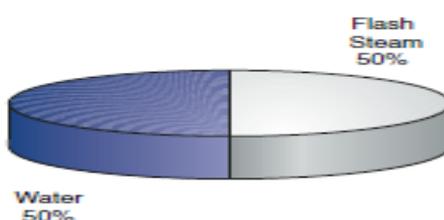


Figura 42. Quantidade aproximada de energia contida no condensado.

Fonte: Spirax Sarco (2004).

Para que se possa aproveitar o vapor reevaporado do condensado a baixas pressões, é preciso primeiro separar o vapor do condensado, usando um tanque de vapor flash (SPIRAX SARCO, 2004). Trata-se de um tanque vertical dotado de uma entrada para o condensado, como mostra a Figura 43. O diâmetro do tanque deve provocar uma queda expressiva na velocidade permitindo que o condensado caia para a parte inferior, sendo, a partir daí, drenado. A altura acima do ponto de entrada, deve ser suficiente para que o vapor extraído seja seco, sem os arrastes que se produzem na zona de separação dos meios (SPIRAX SARCO, 2012b). A Figura 44 apresenta a porcentagem de vapor flash formado dentro dos tanques de acordo com a queda de pressão.

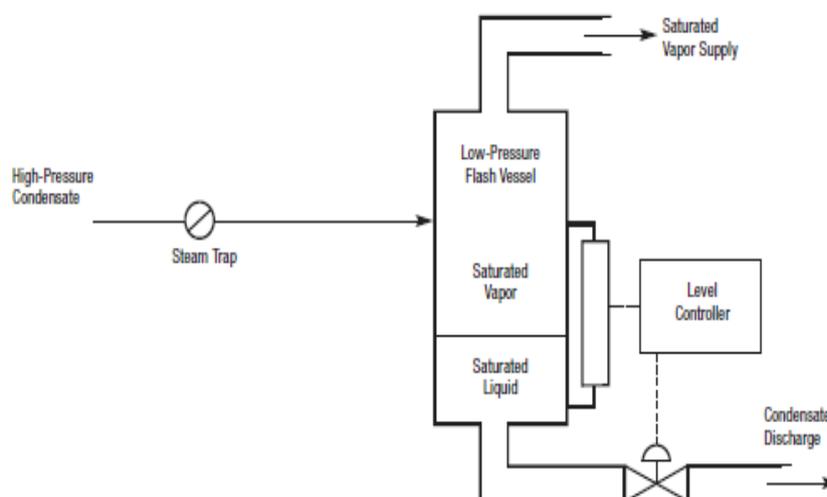


Figura 43. Tanque flash.

Fonte: U. S. Department of Energy (1999).

Alguns cuidados devem ser tomados para o bom aproveitamento do vapor flash (SPIRAX SARCO, 2011):

- Deve haver uma vazão de condensado suficiente proveniente de processos com pressões mais altas, de modo que o vapor flash possa ser liberado e sua recuperação ser economicamente viável;
- O consumo de vapor de pressão baixa deve ter um fornecimento que seja sempre igual ou superior que o vapor flash disponível;
- A aplicação do vapor flash deve ser próxima da fonte de condensado de alta pressão, ou seja, o ponto de drenagem.

Steam Pressure (psig)	Flash Tank Pressure (psig)											
	Atmosphere	0	2	5	10	15	20	30	40	60	80	100
5	1.7	1.0	0									
10	2.9	2.2	1.4	0								
15	4.0	3.2	2.4	1.1	0							
20	4.9	4.2	3.4	2.1	1.1	0						
30	6.5	5.8	5.0	3.8	2.6	1.7	0					
40	7.8	7.1	6.4	5.1	4.0	3.1	1.3	0				
60	10.0	9.3	8.6	7.3	6.3	5.4	3.6	2.2	0			
80	11.7	11.1	10.3	9.0	8.1	7.1	5.5	4.0	1.9	0		
100	13.3	12.6	11.8	10.6	9.7	8.8	7.0	5.7	3.5	1.7	0	
125	14.8	14.2	13.4	12.2	11.3	10.3	8.6	7.4	5.2	3.4	1.8	
160	16.8	16.2	15.4	14.1	13.2	12.4	10.6	9.5	7.4	5.6	4.0	
200	18.6	18.0	17.3	16.1	15.2	14.3	12.8	11.5	9.3	7.5	5.9	
250	20.6	20.0	19.3	18.1	17.2	16.3	14.7	13.6	11.2	9.8	8.2	
300	22.7	21.8	21.1	19.9	19.0	18.2	16.7	15.4	13.4	11.8	10.1	
350	24.0	23.3	22.6	21.6	20.5	19.8	18.3	17.2	15.1	13.5	11.9	
400	25.3	24.7	24.0	22.9	22.0	21.1	19.7	18.5	16.5	15.0	13.4	

Figura 44. Porcentagem de vapor flash formado em relação a queda de pressão.

Fonte: Spirax Sarco (2004).

8.6 TANQUES COLETORES E DE ALIMENTAÇÃO

Os tanques de condensado coletam e armazenam o condensado, e estão normalmente localizados em pontos remotos ao redor do sistema de condensado. Eles são instalados em conjunto com bombas de condensado, como mostra a Figura 40.

Os fluxos de condensado podem ser variáveis. Devido a mudanças na demanda de vapor, especialmente durante a partida do sistema. Tanques coletores minimizam os efeitos dessa variabilidade de fluxo nas bombas, mantendo um nível mínimo de água, impedindo a cavitação (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

Os sistemas de vapor tem ainda um grande tanque receptor de condensado chamado tanque de alimentação que é utilizado para armazenar a água de alimentação da caldeira. Todo o condensado purgado do sistema de distribuição e equipamentos devem ser direcionados para este tanque. Eles podem também ser utilizados para armazenar a água pré-tratada para alimentação da caldeira, devem ser metálicos e com capacidade de no mínimo a capacidade de geração das caldeiras (RODRIGUES, 2012).

Com o subdimensionamento do tanque de alimentação haverá maior dificuldade de condensar o vapor de reevaporação, provocando golpes e perdas de vapor para a atmosfera. Deve-se condensar o máximo de vapor flash possível. Para isso a área global deve ser no mínimo duas vezes a área da tubulação de retorno de condensado. Com isso obtêm-se menor velocidade e maior tempo de contato das bolhas de vapor com a água estocada (RODRIGUES, 2012).

O reservatório de água fria para reposição do tanque de alimentação deve ter capacidade para alimentar sozinha a caldeira. A temperatura ideal para da água de alimentação é de 80 a 90 °C. Não sendo atingida esta temperatura somente com o calor residual do condensado coletado deve-se injetar vapor, evitando o choque térmico, a interrupção de vaporização e o aumento do oxigênio livre (RODRIGUES, 2012).

9 RENDIMENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE VAPOR

A disponibilidade de insumos energéticos em um país reflete diretamente no seu desenvolvimento. Com a elevação dos preços da energia, o consumo racional tornar-se uma atividade estratégica para o setor industrial. Com esse intuito, avaliações energéticas aplicadas nesse setor possibilitam otimizar o desempenho dos seus sistemas térmicos, melhorar a sustentabilidade da instalação, bem como reduzir custos na produção, aliadas ao desenvolvimento de novas tecnologias para os equipamentos e processos.

O rendimento energético de um sistema de vapor pode ser obtido a partir das avaliações energéticas através da identificação de parâmetros termodinâmicos, como trabalho realizado e calor transferido. Utilizando a termodinâmica como ferramenta analítica é possível determinar as perdas de energia, contabilizando os fluxos energéticos do sistema e classificando-os quantitativamente e qualitativamente. As avaliações irão auxiliar na determinação dos pontos de desperdício e locais que tenham margem para implementação de melhorias.

Portanto, a termodinâmica desempenha um papel chave na análise de sistemas e dispositivos nos quais ocorrem transferência e transformação de energia. Ao longo de toda história tecnológica da humanidade, o desenvolvimento das ciências tem reforçado a capacidade de aproveitar a energia e usá-la para as necessidades da sociedade. A revolução industrial é um resultado da descoberta de como explorar a energia, convertendo calor em trabalho (DINCER; ÇENGEL, 2001).

A termodinâmica é baseada essencialmente em duas leis fundamentais da natureza, conhecidas como Primeira e Segunda Lei. A Primeira Lei da Termodinâmica (PLT) é a expressão do Princípio de Conservação de Energia. Ela afirma que a energia é uma propriedade termodinâmica, e que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas a quantidade total de energia permanece constante. Quando se fala de análise energética, esta geralmente se baseia na PLT. Tem como objetivo prover a informação necessária para identificação de oportunidades de redução das perdas de calor contabilizando os fluxos energéticos e assim, melhorar a recuperação de calor. Uma das limitações desse método é a falta de informação disponível sobre a degradação de energia que ocorre no processo, assim como a qualidade dessa energia contida nos fluxos que

saem do processo como produto (DINCER; ÇENGEL, 2001; BAEHR, 1988; MORAN; SHAPIRO, 2009; VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995).

A Segunda Lei da Termodinâmica (SLT) enuncia que a energia pode ser mensurada tanto quantitativamente como qualitativamente e que os processos reais ocorrem na direção da diminuição da qualidade da energia devido às condições não ideais, ou seja, reais (DINCER; ÇENGEL, 2001; MORAN; SHAPIRO, 2009; VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995). As tentativas de quantificar a qualidade ou "potencial de trabalho" de energia utilizando a SLT, resultou na definição das propriedades termodinâmicas entropia e exergia (DINCER; ÇENGEL, 2001). As análises energéticas à luz da SLT, de processos ou equipamentos nos quais ocorrem transferência e transformação de energia podem quantificar a energia disponível, além de apontar os locais em que ocorrem destruição e perdas de exergia e classificá-las por ordem de importância (ÇENGEL; BOLES, 2007; DINCER; ÇENGEL, 2001; BEJAN, 1997).

A exergia pode ser entendida como o potencial máximo capaz de realizar trabalho (energia útil). Como único método de medição da qualidade e disponibilidade termodinâmica de um fluxo energético, é componente chave para o desenvolvimento sustentável, indicando a direção para otimização de um sistema (DINCER; ÇENGEL, 2001). Com a análise exérgica é possível, por exemplo, demonstrar que fluxos energéticos de igual valor, mas sob temperaturas diferentes, têm qualidades ou disponibilidades termodinâmicas distintas (ELETROBRAS, 2007). Recentemente, a análise exérgica tem sido largamente utilizada para avaliação de sistemas térmicos (DINCER; HUSSAIN; AL-ZAHARNAH, 2005; UTLU; HEPBASLI, 2006; KUZGUNKAYA; HEPBASLI, 2007; DIAS; BALESTIERE, 2004; SACHDEVA; KARUN, 2012; AMIR, 2012; SILVA, 2002; MENDES, 2009).

Para calcular a exergia de um sistema, é necessário definir uma referência, geralmente é usado as condições ambientes de temperatura e pressão (NAKASHIMA, 2000). Desta forma, pode-se também definir a exergia como o trabalho máximo que pode ser obtido do sistema em sua interação com o ambiente até o equilíbrio (KOTAS, 1980).

Em condições reais, as perdas de carga e irradiações de calor para o ambiente respondem por parte da degradação da energia útil inserida nos processos. Estas degradações, também chamadas de irreversibilidades, são agentes da geração de entropia e portanto, responsáveis pela redução da qualidade

dos fluxos energéticos, ou seja, a destruição da exergia. (MORAN; SHAPIRO, 2009; VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995). Uma forma de otimizar processos reais é minimizando as irreversibilidades (DINCER; ROSEN, 2008).

Na avaliação da utilização dos recursos energéticos de um sistema de vapor é fundamental realizar medições, as quais conduzirão ao conhecimento de determinados parâmetros termodinâmicos que irão aferir maior ou menor eficácia com que se utiliza energia. A forma mais completa de se saber isso é através dos balanços de massa, de energia e exergia.

9.1 QUALIDADE DA ENERGIA TÉRMICA

Além de quantificar os fluxos de energia térmica utilizados nos pontos de consumo de um sistema de vapor, é importante também determinar a qualidade destes fluxos. Somente com a análise qualitativa é possível determinar a energia térmica realmente disponível para o aquecimento, bem como as oportunidades com maior margem de melhorias no sistema.

É verdade que a energia impulsiona tudo. Nada acontece, nada se cria, sem a dissipação irreversível de energia de alta qualidade em formas degradadas e inutilizáveis. Durante sua utilização uma parte é sempre dissipada como calor para o ambiente. Esta é a essência da primeira e segunda lei da termodinâmica (FLEAY, 2005).

Eletricidade, vapor, ar comprimido e combustíveis são fontes de energia comuns utilizado nas indústrias. Elas podem ser caracterizadas pelo seu conteúdo e qualidade. Por exemplo, 1 KWh de eletricidade tem o mesmo conteúdo energético que 3,6 MJ de vapor (WANG, 2008).

Temos que usar a energia tanto para extrair energia primária de fontes naturais quanto para transformá-la em formas mais convenientes e utilizáveis. A quantidade de energia que precisamos para transformar energia primária em energia útil se tornou uma questão econômica crítica. Quanto maior for o rendimento energético líquido, mais eficaz economicamente é a fonte de energia (FLEAY, 2005).

A classificação quanto à qualidade energética indica a eficiência de utilização da fonte, ou seja, sua disponibilidade para produzir trabalho. Em

processos que envolvem fluxos de calor de uma temperatura mais alta para outra mais baixa (fontes térmicas), somente parte da energia contida é convertida em trabalho, enquanto que para eletricidade, fonte de alta qualidade energética, toda energia contida pode ser utilizada para produzir trabalho (WANG, 2008).

Considerando a exergia a energia disponível de uma fonte de energia para produção de trabalho à medida que alcança um estado de referência. A qualidade termodinâmica de uma fonte pode ser definida pela razão entre o seu conteúdo exergético e energético, como mostra a equação (18) (WANG, 2008).

$$\theta = \frac{Ex}{En} \quad (18)$$

Para eletricidade, os valores de energia e exergia são iguais, assim $\theta = 1$. Para fontes térmicas, como o vapor, a quantidade de trabalho produzido vai depender da temperatura do vapor e das condições ambientes e pode ser encontrada através da equação 19 (WANG, 2008).

$$\theta = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (19)$$

Entre as fontes de energia de alta qualidade estão a energia cinética, potencial e elétrica que podem ser convertidas em outras formas de energia com pequenas perdas. A energia química tem qualidade intermediária, seguida pelas fontes térmicas de alta temperatura e baixa temperatura. Por exemplo, para fornecer 1 J de trabalho para uma turbina em condições ideais é necessário 1 J de eletricidade, ou 2,5 J de vapor a 350 °C ou 4,6 J de vapor a 200 °C, considerando a temperatura de referência de 25 °C (WANG, 2008).

O uso direto de eletricidade para geração de vapor não condiz com o conceito de sustentabilidade já que para produzir 3,6 MJ (1 kWh) de eletricidade, é necessário cerca de 10,8 MJ de energia de um combustível. Isso se deve as perdas de conteúdo energético do combustível na conversão em eletricidade (WANG, 2008).

9.2 BALANÇOS DE MASSA, ENERGIA E EXERGIA DOS COMPONENTES OU OPERAÇÕES QUE COMPÕEM O SISTEMA

Para cada equipamento ou operação que compõem o sistema de vapor balanços de massa, energia e exergia podem ser aplicados para quantificar e qualificar os fluxos energéticos. A partir disso podem ser obtidos parâmetros termodinâmicos que ajudam a caracterizar o perfil energético do sistema e determinar o rendimento energético da planta. A capacidade de realizar trabalho, o calor transferido, os fluxos de exergia, os locais de maiores perdas e a eficiência energética e exergética, são os principais (DINCER; ROSEN, 2008; MORAN; SHAPIRO, 2009).

Os parâmetros termodinâmicos são encontrados considerando um volume de controle em regime permanente, ou seja, as propriedades internas do volume de controle permanecem inalteradas ao longo do tempo (MORAN; SHAPIRO, 2009). Esta definição de regime estacionário é válida na prática apenas em termos médios. Considerando um equipamento térmico operando por um longo período, seus parâmetros médios de funcionamento irão se manter constantes. O regime estacionário assim definido é atingido, portanto, ao fim de um determinado tempo mais ou menos longo, após a partida do equipamento. Depende também da estabilidade da produção nesse mesmo período de tempo.

O volume de controle é determinado pela fronteira do componente ou operação em análise do sistema de vapor, ou seja, a fronteira do sistema em relação ao qual se efetua a contabilização das entradas e saídas. Conhecida a fronteira do sistema, tudo o que passa no seu interior não interessa à realização do balanço, interessará apenas as quantidades de energia que atravessam essa fronteira num sentido ou no outro. É evidente que se houver modificação na localização da fronteira do sistema o balanço é alterado.

Um exemplo prático da aplicação dos balanços para posterior avaliação de eficiência energética e exergética é apresentado no Anexo B. Um evaporador de múltiplo estágio operando em regime estacionário é utilizado como volume de controle.

9.2.1 Balanço de Massa

O balanço de massa se baseia no Princípio de Conservação de Massa, e ao considerar o processo em regime permanente, o fluxo de massa que entra no volume de controle, ou seja, na fronteira do sistema em análise, é igual ao fluxo de massa que sai do volume de controle, obtendo-se a equação (20). Nessas condições, sem alteração com o tempo, apenas a identidade varia continuamente e a quantidade de matéria no interior do volume de controle permanece constante (MORAN; SHAPIRO, 2009).

$$\sum_{entra} \dot{m}_e = \sum_{sai} \dot{m}_s \quad (20)$$

Onde:

$\sum_e \dot{m}_e$ → Somatório do fluxo de massa que entra do volume de controle através da fronteira [kg/h].

$\sum_s \dot{m}_s$ → Somatório do fluxo de massa que sai do volume de controle através da fronteira [kg/h].

9.2.1 Balanço de Energia

O balanço de energia é fundamentado no princípio da conservação de energia, isto é, de toda a energia fornecida a um sistema, uma parte é acumulada no seu interior sob a forma de energia interna, e outra parte é dissipada para o exterior do sistema. Em regime estacionário não há acúmulo de energia no sistema.

Energia pode ser transferida de três formas: calor, trabalho ou massa (DINCER; ÇENGEL, 2001). Assim, o Princípio de Conservação de Energia aplicado a um volume de controle enuncia que (MORAN; SHAPIRO, 2009):

$$\left[\begin{array}{c} \text{Taxa de Variação} \\ \text{de energia} \\ \text{contida no} \\ \text{interior do v.c.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Taxa líquida que} \\ \text{a energia está} \\ \text{sendo transferida} \\ \text{para dentro do v.c.} \\ \text{por calor} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Taxa líquida que} \\ \text{a energia está} \\ \text{sendo transferida} \\ \text{para fora do v.c.} \\ \text{por trabalho} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Taxa líquida que} \\ \text{a energia está} \\ \text{sendo transferida} \\ \text{para o v.c. com} \\ \text{o fluxo de massa} \end{array} \right]$$

$$\Delta E_n = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum_{entra} \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{\dot{V}e^2}{2} + g \cdot ze \right) - \sum_{sai} \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot zs \right) \quad (21)$$

Onde:

$$\sum_e \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{\dot{V}e^2}{2} + g \cdot ze \right) - \sum_s \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot zs \right) \rightarrow \text{Taxa de energia calorífica, potencial e cinética que acompanham o fluxo de massa [kW].}$$

O balanço de energia, representado através da equação (21), mostra que o aumento ou decréscimo da taxa de energia no interior do volume de controle é igual a diferença entre as taxas de transferência de energia entrando ou saindo da fronteira (MORAN; SHAPIRO, 2009). Para processos em regime permanente, a taxa de entrada de massa no volume de controle é igual à taxa pela qual a massa sai. Assim, o balanço de energia pode ser obtido através da equação (22).

$$\sum_{entra} \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot ze \right) + \dot{Q} = \sum_{sai} \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot zs \right) + \dot{W} \quad (22)$$

A partir desta equação, é possível obter a capacidade de realizar trabalho e o calor transferido para o volume de controle em análise. Algumas considerações devem ser feitas para determinar se há no equipamento ou operação variação de energia cinética e potencial. Quando se trata de análise em sistemas térmicos estes componentes geralmente tem valor nulo, pois na maioria dos casos, o sistema está em repouso e as diferenças de altura são desprezíveis (ZANONI, 2004). Neste caso, a equação (23) é obtida.

$$\sum_{entra} \dot{m}_e \cdot h_e + \dot{Q} = \sum_{sai} \dot{m}_s \cdot h_s + \dot{W} \quad (23)$$

9.2.3 Balanço de Exergia

Segundo Dincer e Çengel (2001), a análise exérgica supera as limitações da Primeira Lei, podendo num processo energético, quantificar e apontar a degradação de energia e calcular a magnitude real das perdas de exergia.

Exergia qualifica o potencial do sistema para realizar trabalho, como consequência de não estar completamente em equilíbrio em relação ao estado de referência. A exergia é consumida ou destruída devido a irreversibilidades presentes em processos reais (irreversíveis). O consumo de exergia durante um processo é proporcional à entropia criada devido a irreversibilidades associados ao processo (ROSEN; DINCER, 1999; BEJAN, 1997).

Para a análise de exergia, o estado de referência deve ser definido. Isto é geralmente feito através da especificação da temperatura, pressão ou composição química. Os resultados das análises de exergia, conseqüentemente, são relativos ao estado de referência especificado, que na maioria das aplicações é modelado com o ambiente local real (ROSEN; DINCER, 1999).

Assim, considerando o processo em regime permanente, o balanço da taxa de exergia para um volume de controle pode ser dado pela equação (24).

$$\sum_{entra} m_e \cdot ef_e + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j = \sum_{sai} m_s \cdot ef_s + \dot{E}d + \dot{W} \quad (24)$$

Onde:

$\sum_e \dot{m}_e \cdot ef_e - \sum_s \dot{m}_s \cdot ef_s$ → Somatório dos fluxos de exergia que acompanham os fluxos de massa entrando e saindo do volume de controle;

$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$ → Representa a taxa de transferência de exergia que acompanha a transferência de calor a taxa \dot{Q}_j que ocorre nos pontos da fronteira que a temperatura instantanea é T_j ;

A taxa de fluxo de exergia que acompanha um fluxo de massa é dada pela equação (25). A exergia específica de fluxo, ou seja, a exergia por unidade de

massa que atravessa a entrada ou a saída do volume de controle é calculada através da equação (26).

A quantidade e a qualidade da energia contida nos fluxos que saem do processo como produto podem ser determinadas pela análise da exergia (BAEHR, 1988). Assim, com os resultados obtidos a partir destas equações é possível determinar o fluxo de exergia em cada operação ou equipamento do sistema de vapor e assim determinar a energia realmente disponível para utilização, bem como os locais e magnitudes da destruição de exergia e assim, apontar os pontos com margem de implementação de melhorias.

$$\dot{E}_x = \dot{m} \cdot ef \quad (25)$$

$$ef = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + \frac{V^2}{2} + g \cdot z \quad (26)$$

Em um processo industrial, para que se tenha um bom desempenho energético é importante atrasar o máximo possível à degradação da exergia aproveitando ao máximo o conteúdo energético das fontes.

A exergia pode ser destruída de duas formas (WANG, 2008):

- Perdas internas de energia devido a irreversibilidades do próprio sistema, dada pela equação (27).

$$\dot{E}d = T_0 \cdot \Delta S \quad (27)$$

- Perdas externas de energia nos fluxos de resíduos sólidos e energéticos que não alcançam o equilíbrio com o ambiente, dada pela equação (28).

$$\dot{E}x_{resíduos} = \dot{E}x_{sai} - \dot{E}x_{sai \text{ como produto}} \quad (28)$$

9.2.4 Avaliação da Eficiência Energética e Exergética

Eficiência energética é racionalização de energia e se fundamenta nas leis da Termodinâmica. A eficiência energética abrange o conjunto de ações de racionalização, que levam à redução do consumo de energia, sem perda na quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos, ou no conforto disponibilizado pelos sistemas energéticos utilizados (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

Quando ocorre a conversão, a energia útil que sai nos produtos é menor do que a inserida e uma parte é sempre perdida. A razão entre a saída e a entrada é chamada eficiência. A melhoria da eficiência dos processos é vital para um desenvolvimento sustentável. Os principais parâmetros utilizados para caracterizar a sustentabilidade de um processo são (DE SWAAN ARONS, VAN DER KOOI; SANKARANARAYANAN, 2004):

- Eficiência termodinâmica do processo;
- Extensão do uso de recursos renováveis;
- Extensão do ciclo fechado do processo.

O conceito de um parâmetro de desempenho relacionado com SLT ilustrando o contraste com a eficiência energética da PLT é descrito através da equação (29) para energia, e (30) para exergia, considerando um volume de controle em regime permanente (DINCER; ÇENGEL, 2001).

$$Energia_{entra} = (Energia)_{sai\ como\ produto} + (Energia)_{perdida} \quad (29)$$

$$Exergia_{entra} = (Exergia)_{sai\ como\ produto} + (Exergia)_{perdida} + (Exergia)_{destruída} \quad (30)$$

Um indicador para eficiência da conversão da energia ou exergia em produto é dada pela razão entre o produto e a entrada. A eficiência energética (eficiência da primeira lei – equação (31)) e a eficiência exergética (eficiência da segunda lei – equação (32)) podem ser descritas, respectivamente, por:

$$\varphi = \frac{(Energia)_{sai\ como\ produto}}{Energia_{entra}} = 1 - \frac{Perdas}{Entrada} \quad (31)$$

$$\psi = \frac{(Exergia)_{sai\ como\ produto}}{Exergia_{entra}} = 1 - \frac{(Perdas + Destruição)}{Entrada} \quad (32)$$

Assim, o rendimento energético de cada operação ou equipamento do sistema de vapor pode ser determinado, bem como o desempenho energético global do sistema. A partir disso, é possível apontar os pontos do sistema passíveis de otimização, visando melhorar o uso da energia, aproveitando ao máximo a fonte disponível.

10 PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Diante do histórico de consumo energético intensivo da indústria, e de adversidades cada vez mais explícitas para a produção de energia, com a inclusão de custos socioambientais crescentes nos orçamentos dos projetos energéticos, os diversos setores industriais do Brasil conclamam por programas sistemáticos de eficiência energética (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

As instalações de processamento são grandes consumidoras de insumos, que são utilizados como matéria-prima para produção, e como fonte de energia para desenvolver seus vários processos (SINGH, 1986). Auditorias conduzidas nestas instalações mostram constantes oportunidades de aumentar a eficiência dos seus sistemas energéticos, indicando, em muitos casos, uma significativa margem para adoção de medidas de racionalização com viabilidade econômica e permanente e amplo benefício (ELETROBRAS, 2005a).

Um Programa de Conservação e Gerenciamento de Energia (PCGE) apresenta técnicas e métodos para definir metas e ações para melhorar a eficiência energética e eliminar os desperdícios nos processos de geração, transporte e uso da energia. O programa, mediante uma abordagem metódica dos fluxos energéticos do sistema em análise, vai apontar quem, quanto e como se está consumindo energia e assim, alicerçar a implementação de um programa de uso eficiente dos recursos energéticos (WANG, 2008; ELETROBRAS, 2006). Assim uma produção mais eficaz, com maior produtividade, ou seja, produzir em maior quantidade com menos insumos.

O Programa de Conservação e Gerenciamento de Energia utiliza como base para o diagnóstico energético, fundamentos de auditoria energética, que compreende uma estratégia utilizada para monitorar o consumo e os custos energéticos em uma instalação. A auditoria energética pesquisa a instalação: (1) para determinar onde e como a energia é utilizada ou convertida de uma forma para outra; (2) para identificar oportunidades de reduzir o consumo de energia; (3) para avaliar a viabilidade econômica e técnica de implementação destas reduções; (4) formular recomendações prioritárias na implementação de melhorias de processos para economizar energia (WITTE; SCHMIDT; BROWN, 1998; CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005).

Diante da crescente pressão ambiental, o mercado está cada vez mais orientado a dar preferência a empresas que utilizem racionalmente os recursos naturais. Um PCGE eficiente e que, simultaneamente, contribua para a melhoria da sustentabilidade e, conseqüentemente para o meio ambiente, promove publicidade positiva para empresa perante seus clientes e a sociedade em geral.

A implantação de um PCGE é a primeira ação ou decisão que vise à redução das perdas e desperdícios de energia em uma empresa. A importância da implantação do PCGE deve-se ao fato de que ações de conservação de energia isoladas, por melhores resultados que apresentem, tendem a perder o seu efeito ao longo do tempo. Um PCGE deve ser estruturado de forma que os resultados de sua implementação se mantenham através do monitoramento permanente (GODOI; OLIVEIRA JÚNIOR, 2009; WANG, 2008).

Para conduzir a implementação do PCGE é necessário a adoção das seguintes medidas (ELETROBRAS, 2005a):

- Conhecer as informações sobre fluxos de energia, regras, contratos e ações que afetam esses fluxos; os processos e atividades que usam energia, gerando um produto ou serviço mensurável; e as possibilidades de economia de energia.
- Acompanhar os parâmetros de controle, como: consumo de energia (absoluto e específico), custos específicos, preços médios, valores contratados, registrados e faturados, e fatores de utilização dos equipamentos e/ou da instalação.
- Atuar no sentido de medir os itens de controle, indicar correções, propor alterações, auxiliar na contratação de melhorias, implementar ou acompanhar as melhorias, motivar os usuários da instalação a usar racionalmente a energia, divulgar ações e resultados, buscar capacitação adequada para todos e prestar esclarecimentos sobre as ações e seus resultados.

Segundo Godoi e Oliveira Júnior (2009), estruturalmente, o gerenciamento energético é alicerçado em ferramentas gerenciais bem determinadas, como a auditoria energética, os programas de treinamento, o relatório de registro de resultados, a implementação das ações corretivas recomendadas, o controle das interfaces gerenciais, o referencial analítico, a publicação de ações e resultados, e a

retroalimentação como componente principal do seu aperfeiçoamento. Como mostra a Figura 45.



Figura 45. Ferramentas base para gestão energética.

Fonte: Godoi; Oliveira Junior (2009).

A implantação de um PCGE requer mudanças de procedimentos, de hábitos e de rotinas de trabalho, o que, na maioria das vezes, é um obstáculo difícil de ser superado, em virtude da resistência natural que as coletividades oferecem a propostas desse tipo (WANG, 2008).

A alta direção da empresa deve estar compromissada com o objetivo maior, a racionalização do consumo de energia. Este comprometimento deve ser feito mediante um trabalho conjunto e envolver também seu corpo funcional, técnico e administrativo, na busca do objetivo. Só assim, demonstrando claramente seu desejo em atingir as metas propostas a empresa irá superar as dificuldades inerentes às resistências coletivas (ELETROBRAS, 2006).

As ações de melhoria de desempenho visando o uso eficiente da energia contemplam dois tipos principais de medidas (ELETROBRAS, 2005a):

a) Medidas que impliquem ações de gerenciamento das instalações, incluindo:

- Treinamento de pessoal, com o objetivo de conscientizar os colaboradores da empresa;
- Fixação de procedimentos padrões de operação, de manutenção e de engenharia, objetivando a continuidade do programa a ser desenvolvido.

b) Medidas que impliquem ações de upgrade tecnológico, com a substituição de equipamentos existentes por outros mais eficientes.

As medidas propostas no item (a) darão ênfase aos aspectos de educação e de treinamento, e deverão ter custos significativamente menores do que as medidas propostas no item (b), ainda que seus efeitos somente sejam obtidos no médio/longo prazo. As medidas propostas no item (b) incluirão a aquisição de equipamentos, devendo, portanto, representar investimentos elevados, porém com efeitos em curto prazo.

Assim, implantar um PCGE eficiente requer capital de investimento. Portanto, é importante realizar uma análise econômica e quantificar o retorno do projeto como base para tomar decisões quanto sua implementação. A análise financeira é decisiva para o sucesso do projeto. A adaptação de uma tecnologia de conservação de energia em um processo de uma indústria requer uma compreensão completa do seu desempenho técnico e econômico (WANG, 2008).

A experiência internacional indica que medidas de educação e de treinamento, tipicamente, resultam em redução do consumo de energia na ordem de 5% após o período de um ano, a partir do início de sua implementação, a um custo inferior a 1% do custo total de um PCGE global (ELETROBRAS, 2006; BATISTA, 2011).

Considerando uma abordagem genérica, a ser adaptada caso a caso, a sequência apresentada na Figura 46, pode ser adotada para o desenvolvimento de um diagnóstico energético.

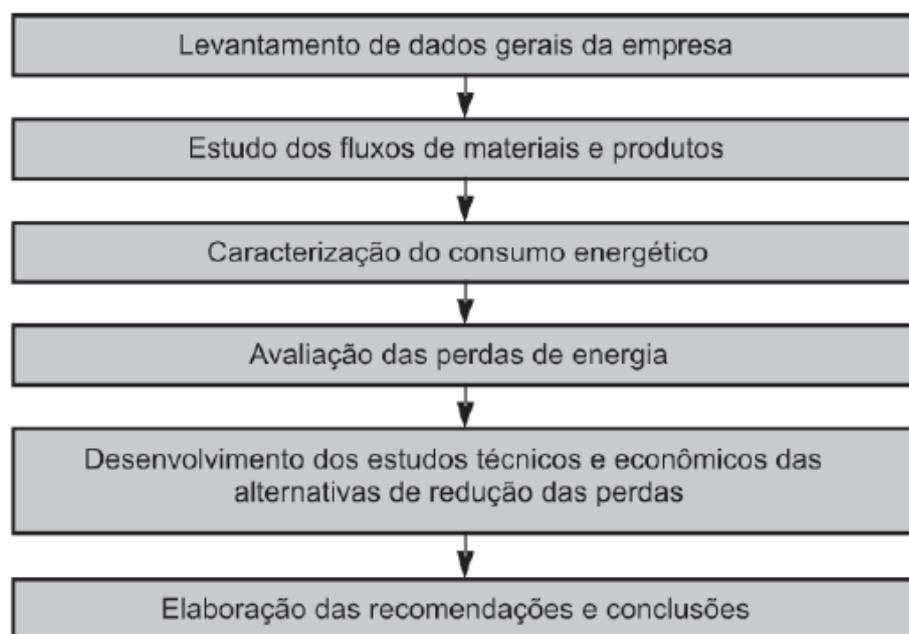


Figura 46. Etapas para um diagnóstico energético.

Fonte: ELETROBRAS (2007).

O gerenciamento energético de uma empresa pode ser conduzido utilizando como ferramenta a norma da ABNT NBR ISO 50001 – “Sistema de Gestão de Energia”. O objetivo desta Norma é permitir que as organizações estabeleçam os sistemas e processos necessários para melhorar o desempenho de energia, incluindo eficiência, uso, consumo e intensidade da energia. A implementação da Norma deve levar a reduções em custos de energia, emissões de poluentes e outros impactos ambientais através da gestão sistemática da energia (ABNT, 2011).

A Norma especifica os requisitos de um sistema de gestão de energia para uma organização desenvolver e implementar uma política de energia, estabelecer objetivos, metas e planos de ação que considerem os requisitos legais e as informações relativas ao uso significativo de energia. Ela pode ainda, ser utilizada para certificação, registro e auto declaração de um sistema de gestão de energia (ABNT, 2011).

10.1 AUDITORIAS DE ENERGIA

Como qualquer outro fator de produção, a energia deve ser gerida continuamente e eficazmente. Embora o argumento da redução de custos e aumento da competitividade continue naturalmente a ser aquele que mais sensibiliza a generalidade das indústrias, a crescente pressão ambiental veio reforçar a necessidade de utilizar a energia de forma racional.

As auditorias de energia podem ser definidas como um exame detalhado das condições de utilização de energia em uma instalação. A auditoria permite conhecer onde, quando e como a energia é utilizada ou convertida de uma forma para outra, qual a eficiência dos equipamentos e onde se verificam desperdícios de energia, tornando possível a recomendação de soluções para as anomalias encontradas através de avaliações de viabilidade técnica e econômica (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005).

Estudos recentes mostram que em centenas de auditorias energéticas, conduzidas em indústrias e outros consumidores de energia térmica, as possibilidades de melhorar o desempenho da geração, distribuição e utilização de vapor eram constantes, sinalizando, em muitos casos, um significativo potencial para adoção, de medidas mitigadoras de perdas com viabilidade econômica e permanente e amplo benefício (ELETROBRAS, 2005b).

A eficiência energética requer uma abordagem estruturada e contínua. Assim, o PCGE se utiliza de fundamentos de auditoria de energia como base para o diagnóstico energético e como estratégia para monitorar o consumo e os custos.

A auditoria inicia com a revisão do histórico energético da instalação para estabelecer uma linha de atuação. Segundo Wang (2008), os seguintes dados devem ser levantados:

- Gastos de energia, incluindo adicionais ligados ao uso, transporte e geração de energia;
- Informações descritivas da estrutura física da instalação;
- Localização geográfica e registro meteorológico;
- Equipamentos/operações que consomem mais energia;
- Tempo de operação dos equipamentos.

Devem ser feitas considerações quanto às sazonalidades de demanda, que podem influenciar na determinação do perfil de demanda da instalação utilizado para identificar padrões de uso. Além disso, para o consumo refletir melhor as mudanças na produção pode ser necessário normalizar os dados, estabelecendo assim uma tendência para o uso de energia (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005).

Ao finalizar uma auditoria, um relatório deve ser gerado com todas as informações recolhidas. Witte et. al., (1998) e Capehart et. al., (2006) fornecem um esboço para os tópicos típicos de um relatório de recomendação de um PCGE:

- Sumário, contendo os procedimentos utilizados na auditoria, os resultados preliminares e uma tabela das recomendações de conservação de energia;
- Introdução, contendo o conceito de uma auditoria energética, a descrição breve do sistema em análise e seus componentes, e os principais equipamentos ou operações consumidores de energia;
- Procedimentos da auditoria energética, contendo as inspeções e medições realizadas nas instalações, os dados levantados, além dos balanços energéticos;
- Distribuição do consumo de energia na instalação, com a descrição do perfil energético do sistema e seus componentes;
- Avaliação técnica e econômica das oportunidades identificadas de conservação de energia;
- Recomendação de um plano de ação.

Anexos e apêndices também podem ser incluídos com exemplos de cálculos, figuras, tabelas, estimativas de custos de equipamentos, etc.

Assim, utilizando as auditorias de energia como base para o levantamento e acompanhamento sistemático permanente dos dados pertinentes ao uso de energia é possível controlar as perdas e desperdícios de insumos energéticos e reagir diante de um desvio.

10.2 ANÁLISE FINANCEIRA DE PROJETOS

A avaliação financeira de projetos de eficiência energética é uma área chave, de crescente importância econômica e essencial para o planejamento corporativo, principalmente, neste momento em que os preços de energia estão cada vez mais elevados com a incorporação dos custos socioambientais e a grande pressão da sociedade para o desenvolvimento sustentável.

Estudos recentes demonstram na prática que projetos de eficiência energética são investimentos de baixo risco e de elevado retorno econômico e ambiental (WANG, 2008; ELETROBRAS 2005a; ELETROBRAS, 2007; CAPEHART, SPILLER; FRAZIER, 2006; FISHER; BLACKMAN; FINNELL, 2007). A análise financeira é a chave para aprovação de projetos pela corporação. Se a apresentação do projeto for realizada utilizando linguagem e termos reconhecidos pela empresa com argumentos comerciais e esquemas para posterior implementação, as chances de aprovação serão maiores.

Sendo assim, gestores de energia necessitam de um entendimento profundo de como a análise financeira é aplicada para avaliar o retorno do investimento e assim comparar e priorizar projetos para obtenção da aprovação.

O grande limitante para os investimentos nesses projetos é a falta de preparo e conhecimento dos profissionais responsáveis pela avaliação energética na hora de apresenta-los às corporações. Dessa forma, a preferência dos investimentos é no aumento da produção/vendas ao invés da redução de custos.

Por exemplo, uma empresa com uma conta de energia elétrica de R\$ 60 milhões ao ano, um corte de 10% equivaleria a uma redução de custos de aproximadamente R\$ 6 milhões ao ano. Se ao invés de investir na redução dos custos a preferência for o aumento da produção/vendas e a margem de lucro for 15%, as vendas teriam que aumentar em R\$ 40 milhões ao ano para ter o mesmo impacto (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

Os investimentos necessários para implementação das oportunidades de conservação de energia, podem ser amplamente classificados em custos de capital e custos operacionais. Os capitais de investimento são geralmente mais estratégicos e tem efeitos em longo prazo. Decisões a respeito de um capital de investimento são normalmente feitas em níveis mais elevados de gestão de uma empresa,

considerando as consequências fiscais adicionais em comparação aos custos operacionais. Os investimentos que requerem capital de investimento têm quatro características (WANG, 2008):

- Grandes custos iniciais;
- Longos períodos de retorno do investimento;
- Procedimentos irreversíveis;
- Significativas implicações fiscais dependendo da escolha do método de financiamento.

Assim, para analisar a viabilidade de implementação de oportunidades que contribuam com a eficiência do sistema de vapor, deve-se considerar (U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2004):

- Um sistema de gestão de energia que atenda às necessidades competitivas de mercado;
- Determinação do custo do ciclo de vida da implementação de cada oportunidade;
- Identificação das opções com os maiores benefícios líquidos;
- Colaboração da equipe financeira para identificar prioridades atuais da empresa (por exemplo, a redução do impacto ambiental e custos de conformidade ambiental e melhor utilização energia);
- Geração de uma proposta que demonstra como os benefícios das oportunidades de melhoria da eficiência do sistema de vapor irá diretamente responder às atuais necessidades das empresas;
- Geração de uma proposta que identifica os incentivos disponíveis para um investimento.

A análise financeira é composta por uma série de métodos, competências, ferramentas, atividades e ideias. O investimento pode ser em itens como equipamentos novos, mais eficientes. O retorno pode ser descrito como a economia de energia gerada pela instalação do equipamento, ou o aumento da eficiência ou das receitas (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

O primeiro benefício avaliado em uma análise financeira são as economias resultantes do projeto, especialmente as economias de energia. Porém, os projetos

de eficiências energética proporcionam uma vasta gama de benefícios, que podem incluir (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005):

- Economia de energia, insumos e tempo;
- Melhoria no conforto e satisfação dos ocupantes;
- Aumento da produtividade;
- Aumento da vida útil do equipamento e do valor agregado;
- Aumento da sustentabilidade do processo;
- Redução do impacto ambiental.

Embora alguns desses benefícios sejam intangíveis pode ser útil incluí-los na apresentação do projeto.

Para tomar a decisão final sobre a implementação do projeto, a corporação deve realizar um longo processo interno de orçamento de capital. Esse processo, também chamado de avaliação de investimento, irá ajudar na decisão da viabilidade ou não do ponto de vista financeiro (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008).

A análise financeira de projetos deve se adaptar aos critérios de decisão e métodos de cálculos exigidos pela corporação e a partir disso avaliar a recuperação do investimento no projeto de eficiência energética para posteriormente tomarem a decisão quanto a sua aprovação.

Os passos a serem realizados pelo gestor de energia para avaliação e aprovação do projeto na análise de investimento incluem (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005):

1. Montagem de uma Tabela de Fluxo de Caixa;
2. Cálculo do período de *Payback*;
3. Cálculo do valor atual ou *Payback* descontado;
4. Cálculo do Valor Atual Líquido (VAL);
5. Cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR);
6. Tomada de decisão com base na análise.

Como foi dito, existem várias formas de avaliar o valor financeiro de um projeto. Por isso é importante um conhecimento sólido dos termos financeiros mais comuns utilizados nas análises financeiras, de forma a ser capaz de utilizá-los e explicá-los com clareza ao apresentar o projeto. No Anexo C é apresentado um

exemplo prático de uma proposta de projeto de eficiência energética para análise financeira e tomada de decisão quanto sua viabilidade de investimento.

10.2.1 Fluxo de Caixa

Uma forma fácil de demonstrar as economias e custos associados com um investimento é o fluxo de caixa (FC). O fluxo de caixa é por definição uma representação esquemática do dinheiro líquido que entra ou sai cada ano. O dinheiro recebido (ganhos/economias) representa o fluxo de caixa positivo e o dinheiro pago (custo inicial, de manutenção ou com taxas) representam fluxo de caixa negativo (WANG, 2008).

Futuras economias ou receitas são exemplos de entrada de caixa. Investimento inicial, adicionais ou gastos operacionais posteriores são exemplos de saída de caixa. A diferença entre eles é o dinheiro líquido (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008).

Geralmente em um investimento o fluxo de caixa inicial é negativo, com a expectativa de um fluxo de caixa positivo no futuro decorrente dos benefícios da implementação do projeto de eficiência energética, como a redução de custos de energia.

10.2.2 Retorno de Investimento

A análise de retorno de investimento (ROI) é a taxa de retorno ou benefício obtido através de um projeto comparado com o investimento efetuado. É usualmente expresso em porcentagem. A equação (33) pode ser utilizada para calcular um ROI simples (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012)

$$ROI = \frac{Ganhos - Custos}{Custos} \quad (33)$$

Durante o processo de análise do ROI é preciso fazer algumas considerações (CAPEHART; TURNER; KENNEDY, 2005):

- Estabelecer o indicador financeiro a ser utilizado para analisar o investimento;
- Obter os dados exatos necessários para efetuar a análise;
- Definir o limite ou taxa mínima de atratividade do investimento;
- Listar todos os benefícios com o investimento;
- Determinar o impacto dos benefícios no resultado financeiro.

Um ROI acima de zero indica que o investimento traz retorno positivo, ou seja, reembolso daquilo que foi gasto. Porcentagens maiores indicam retornos elevados.

O método do ROI simples é de fácil compreensão e é comumente utilizado. Porém ele não indica quanto tempo demorará a se obter o retorno do investimento. Além de ignorar questões como a variação do valor do dinheiro (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

Existem outras medições financeiras que levam o valor do dinheiro no tempo em conta e oferecem uma visão mais sofisticada do investimento.

10.2.3 Custo de Capital

O financiamento das atividades executadas pelas empresas é realizado por meio da aplicação de diferentes tipos de fundos obtidos externamente ou gerados no decorrer das operações. Uma classificação bem simples divide esses fundos em duas categorias capital próprio e capital de terceiros.

Ao investir ou aplicar um capital em um determinado investimento, exige-se um retorno mínimo a título de remuneração. O custo de capital é o valor que define como a empresa pode obter dinheiro para executar o projeto. Representa o retorno necessário para que um projeto de orçamento de capital seja lucrativo (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008). Logo, o custo do capital pode ser representado pela taxa de juros que as empresas usam para calcular, descontando o valor do

dinheiro no tempo (ATKINSON et al., 2000). Geralmente as empresas comparam investimentos utilizando uma taxa de juros de mercado de 8% (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).

10.2.4 Período de Recuperação do Investimento ou *Payback*

O *payback* é denominado como o tempo de reembolso de um investimento ou empréstimo, ou seja, o período para recuperar o investimento ou ainda, o tempo que o investimento leva para zerar o fluxo de caixa acumulado (URTADO et al., 2009).

O método de *payback* deve dar resposta as seguintes perguntas (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2008):

- Quando o dinheiro é recebido de volta?
- Quando o projeto atinge o ponto de equilíbrio do investimento?

O período de recuperação do investimento simples é o inverso do ROI, pode ser obtido pela equação (34).

$$Payback = \frac{Custo}{Ganhos} \quad (34)$$

As vantagens no uso deste método é a simplicidade no entendimento e do cálculo, sendo conveniente sua utilização como regra interna básica na tomada de decisões rápidas para rejeitar uma proposta ou prosseguir com a análise financeira (HIRSCHFELD, 2009).

A desvantagem é que ele não leva em consideração os benefícios após o final do período de recuperação do investimento, apenas o tempo de recuperação do investimento inicial. Dessa forma, não mede o benefício real do investimento. Isso poderia induzir os analistas a rejeitar bons projetos e a aceitar projetos inferiores (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2008). Além disso, ele não leva em consideração o valor variável do dinheiro no tempo, tornando-o descartável na tomada de decisão de um grande investimento (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008).

10.2.5 *Payback* Descontado

Para atender algumas limitações do *payback* simples, pode-se utilizar o método do *payback* descontado que tem o custo de capital embutido.

O *payback* descontado pode também ser chamado fluxo de caixa descontado (FCD) e significa o tempo necessário para obtermos o retorno do investimento feito, considerando o valor do dinheiro no tempo e uma determinada taxa de rendimento para este capital investido. (DAMODARAN, 1997).

O cálculo do *payback* descontado é similar ao *payback* simples, exceto que é descontado primeiro os fluxos de caixa, e assim são feitas as reduções dos pagamentos futuros pelo custo de capital. Uma vez que esse dinheiro ainda não terá sido recebido, o seu valor será inferior ao valor do dinheiro hoje (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008). A equação (35) pode ser utilizada para encontrar os valores de fluxo de caixa descontado e determinar o período para recuperação do investimento contabilizando a variação do valor do dinheiro no tempo.

$$FCD = \frac{\text{Receita do ano } j - \text{Despesa do ano } j}{(1 + i)^j} \quad (35)$$

10.2.6 Valor Presente Líquido

O valor atual (VA) de uma quantia futura (VF) de dinheiro expressa um fluxo de renda atual e renda futura (ou pagamentos) como a quantia equivalente recebida (ou paga) hoje. Seu cálculo depende da taxa de juros e leva em conta o valor variável do dinheiro no tempo (SCHNEIDER ELETRIC, 2012). Através da equação (36) é possível determinar o valor atual de um investimento.

$$VA = \frac{VF}{(1 + i)^j} \quad (36)$$

O valor presente líquido (VPL) de um projeto de investimento é igual ao valor presente de suas entradas de caixa, menos o valor presente de suas saídas de caixa. O objetivo é determinar os retornos do investimento no valor presente e analisar se o investimento deve ser feito ou não (URTADO et. al, 2009).

Podemos ter as seguintes possibilidades para o VPL de um projeto de investimento (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008):

- Maior do que zero: significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa é maior do que o valor presente das saídas de caixa;
- Igual à zero: o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas de caixa é igual ao valor presente das saídas de caixa;
- Menor do que zero: indica que o investimento não é economicamente atrativo porque o valor presente das entradas de caixa é menor do que o valor presente das saídas de caixa.

A equação (37) é utilizada para determinar o VPL de um investimento.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (37)$$

De modo geral, o VPL e o FCD aplicam a mesma ideia, porém em respostas diferentes. Enquanto o resultado do FCD apresenta um período de tempo, o VPL fornece o valor total do projeto.

Este é um método simples e de fácil aplicação, e bastante utilizado na tomada de decisões quanto à viabilidade econômica de investimentos. Além disso, leva em conta o valor atual do montante a ser investido no projeto.

10.2.7 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR), é a taxa necessária para igualar o valor de um investimento (valor presente) com os seus respectivos retornos futuros ou saldos de caixa. Sendo usada em análise de investimentos significa a taxa de retorno de um projeto (SILVA, 2002).

A TIR é a taxa de desconto que faz com que o VPL do projeto seja zero. Um projeto é atrativo quando sua TIR for maior do que o custo de capital do projeto (DAMODARAN, 1997).

A aplicação do método da TIR na avaliação de investimentos permite encontrar a taxa de juros correspondente a um valor que representa os benefícios esperados com o projeto. A partir do conhecimento da taxa será possível compará-la com as taxas recebidas hipoteticamente se o dinheiro fosse investido em outros projetos (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008).

O Cálculo da TIR pode ser feito de forma iterativa, ou diretamente através de calculadoras financeiras ou planilhas de cálculo.

A TIR leva em consideração a variação do dinheiro no tempo e fornece um parâmetro de comparação para outros projetos de investimento. Porém, não considera o tamanho do investimento inicial e em certos casos, o método poderia favorecer a tomada de decisões em torno de projetos menores com TIR mais alta e não projetos maiores com percentuais de TIR mais baixo e VAL mais alto (SCHNEIDER ELETRIC, 2012).

10.2.8 Taxa Mínima de Atratividade

A taxa mínima é característica de cada empresa, e representa a taxa de retorno que a empresa aceita um investimento de risco, para abrir mão de um retorno certo num investimento sem risco no mercado financeiro, ou seja, é a mínima taxa aceita para a aplicação do capital da empresa num investimento (DAMBROWSKI; BRESSIANI, 2008).

A taxa mínima de atratividade (TMA) é geralmente determinada mediante a avaliação das oportunidades existentes de expansão das operações, a taxa de retorno de investimento ou outros fatores considerados relevantes pela corporação (HIRSCHFELD, 2009).

Um dos grandes problemas de se utilizar a TMA como parâmetro é que projetos rentáveis serão rejeitados. Além disso, uma TMA excessivamente alta favorece projetos de curto prazo em detrimento de projetos de longo prazo. Portanto, um método comum para avaliação da TMA é aplicar ao projeto o método do FCD e comparar o valor obtido com retorno possível se os mesmos recursos fossem investidos no mercado imobiliário (SCHNEIDER ELETRIC, 2012).

11 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE VAPOR

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (2013), lista algumas etapas a serem seguidas para implementação e monitoramento de um Sistema de Gestão de Energia (SGE), através de um processo de melhoria contínua que segue o padrão internacional para sistemas de gerenciamento energético (ISO 50001). Este tipo de sistema de gerenciamento pode e deve ser implantado para todas as fontes energéticas de uma organização, inclusive vapor.

Para iniciar a implantação é preciso identificar os benefícios que poderão ser obtidos, estabelecer um plano claro para implantação, entender os documentos e registros de gestão necessários e obter o comprometimento da alta direção.

Um perfil energético dos sistemas de energia da empresa deve ser levantado através de uma revisão energética, que servirá de base para o processo de planejamento energético, que inclui o estabelecimento de objetivos, metas e planos de ação.

Em seguida, o acompanhamento da implantação dos resultados designados no processo de planejamento é gerenciado através de mecanismos que permitem determinar onde e como o desempenho de energia e as melhorias no desempenho energético podem ser obtidos.

Finalmente, um procedimento de monitoramento e verificação do SGE deve ser estabelecido para assegurar a eficácia da gestão, a melhoria do desempenho energético e o cumprimento dos planos de ação. Dessa forma, garantir a melhoria contínua do SGE.

11.1 INICIANDO A IMPLEMENTAÇÃO

A implementação inicia com o levantamento das informações sobre os benefícios gerados pelo gerenciamento e racionalização da energia. Isso pode ser feito através da elaboração de um *business case* (caso de negócio). Segundo Duclós e Santana (2009), *business case* é uma forma profissional de justificar o

investimento para aprovar um projeto estratégico que agrega valor ao negócio da empresa.

Embora conservação de energia, eficiência energética, consciência ecológica, sustentabilidade e afins, sejam conceitos nobres que deveriam sensibilizar a organização para minimizar o consumo de energia, os resultados financeiros e a viabilidade são os fatores que determinam o nível de esforço das iniciativas organizacionais.

Uma vez que a alta direção abraça o conceito e toma a decisão de avançar, eles devem demonstrar seu compromisso, fornecendo aval e recursos para a melhoria contínua no desenvolvimento, implantação e operação do SGE. A alta direção é responsável por elaborar a política energética, indicar um representante da direção para supervisionar o SGE e a equipe de energia para auxiliá-lo. Além de garantir a melhoria contínua e estimular a consciência organizacional nos colaboradores.

Para estabelecer a estrutura de implementação do SGE o representante da gerência e a equipe de energia devem elaborar um plano de ação. O plano deve considerar o período total para a implementação, metas e prioridades organizacionais, responsabilidades e recursos, e se possível a integração com outros sistemas de gestão. Dessa forma, fornecer um roteiro para o sucesso.

Em média, leva de 12 a 24 meses para implementar um sistema de gerenciamento de energia. Se a organização já possui um sistema de gestão como ISO 9001 ou 14001, pode levar menos tempo.

Outro elemento que deve ser considerado ao iniciar a implementação do SGE é a compreensão da função dos documentos e registros do sistema, e as decisões que a organização deve fazer sobre sua documentação.

A documentação pode orientar o comportamento e as atividades, bem como demonstrar o que foi feito dentro do SGE. Assim, além de ajudar a implementar o sistema, assegura o seu funcionamento adequado ao longo do tempo e fornece evidências dos resultados que são alcançados.

A extensão da documentação requerida dentro de uma determinada organização vai depender de inúmeros fatores. O tamanho da empresa, os tipos de atividades desenvolvidas, a complexidade dos processos e suas interações e a competência dos colaboradores, são os principais. Entre a documentação exigida

estão a política de energia, os objetivos e as metas de energia e os planos de ação. Estes e outros documentos necessários estão listados no Anexo D.

11.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

A elaboração de um SGE requer um planejamento energético que permita a organização descrever seu perfil energético em qualquer momento no tempo. Esse planejamento envolve uma análise das atividades que podem afetar o desempenho energético. Ele engloba a coleta, registro e análise de dados de medição e informações das fontes de energia. Estes dados irão constituir um banco de dados que formará a revisão energética, que será usada para determinar o perfil energético da organização e fornecer informações sobre energia para apoiar as atividades de planejamento e outras decisões. Além disso, a partir da revisão energética será possível estabelecer uma linha de base que servirá de referência nas mudanças de desempenho futuros, bem como no estabelecimento de indicadores de desempenho energético e de objetivos, metas e planos de ação.

Um sistema de gestão bem-sucedida se baseia em dados precisos e adequados. Os dados coletados devem fornecer um perfil preciso da situação energética da organização. Para isso, devem ser incluídas na revisão energética todas as fontes de energia utilizadas, análise do histórico de consumo dos últimos anos e do consumo atual, identificar instalações, sistemas, processos ou equipamentos que consomem uma quantidade significativa de energia (pontos de maior consumo), variáveis relevantes que afetam os pontos de consumo significativo e estimativas de consumo de energia para o futuro.

As medições de parâmetros úteis na caracterização do sistema podem ser a partir da instrumentação existente ou por medições instantâneas para verificar os valores reais e estabelecer as condições de operação e características dos sistemas energéticos.

A localização da coleta dos dados deve ser identificada com precisão. Além disso, o método e o equipamento utilizado nas medições devem ser registrados para

que haja padronização na aquisição dos dados. Para maior qualidade na coleta podem ser incluídos nos registros:

- Os dados de energia necessários na coleta;
- A localização dos dados;
- Pessoa ou fonte que irá manter os dados;
- Frequência da coleta;
- Local de armazenamento de dados e como ocorre o registro;
- Escolher e implementar uma ferramenta de gestão de dados.

A análise de dados de energia consistirá inicialmente em determinar os pontos de maior consumo, estabelecendo as medidas relevantes e identificando as áreas passíveis de implantação de melhorias de desempenho.

A designação de alguns sistemas, equipamentos ou instalações apontados como significativos, permite a organização concentrar seus recursos em melhorar e manter um ótimo desempenho em um pequeno número de sistemas críticos. Essa abordagem garante a melhor utilização dos recursos, geralmente limitados, de uma organização para o gerenciamento de energia.

Uma compreensão dos sistemas energéticos e a determinação da quantidade de energia consumida obtida a partir de um balanço energético (apresentado no item 10.2) é o primeiro passo para determinar os pontos de uso de energia significativos. Para auxiliar nesse processo, podem-se obter os diagramas de fluxo de processo e listas de equipamentos da instalação, identificar os fluxos de fontes energéticas primárias e secundárias no diagrama de fluxo e obter os dados de identificação, horas de funcionamento, fator de serviço e fatores de carga para os equipamentos e processos associados.

No balanço de energia o consumo total de energia de todas as fontes de energia primárias dentro de uma instalação é atribuída a um equipamento específico e/ou sistemas. Ele pode ser feito a partir do diagrama de fluxo do processo e a lista de equipamentos com suas características operacionais.

A lista dos pontos de uso de energia significativos e o método usado para selecioná-los é um importante documento no planejamento da gestão energética. Uma vez que, os pontos de maior consumo são uma “característica chave” (variáveis

que determinam a performance energética da organização) de desempenho energético que são regularmente monitorados, medidos e analisados.

Um indicador de desempenho energético é desenvolvido para definir o desempenho de um ponto de consumo significativo. Há indicadores semelhantes que podem ser desenvolvidos para equipamentos, processos, instalações e pessoal. Seguir esses indicadores irá revelar tendências que permitem a comparação da eficiência energética ao longo do tempo.

Os indicadores de desempenho energético são as medidas quantitativas de desempenho energético, e podem ser usados para quantificar a melhoria no consumo, transmissão e utilização da energia, ao nível da área administrativa, instalações, sistema, processos ou equipamentos. Eles devem ser aceitos pelos gestores como uma representação exata do desempenho energético. Melhorias no desempenho serão determinadas pela comparação dos indicadores atuais com os valores iniciais da linha de base energética.

Os indicadores geralmente relacionam o consumo de energia, custo ou impacto ambiental a uma saída adequada. Para operações comerciais, indicadores podem ser Watts/unidade produzida ou Watts/\$ valor agregado ao produto. Algumas variáveis independentes devem ser monitoradas, pois podem influenciar nos indicadores:

- Tempo;
- Período de operação (dia, semana, horas, feriados);
- Variedades de produtos;
- Variações de entrada, por exemplo materiais ou níveis de umidade;
- Variações de saída, por exemplo modelo ou o número de unidades;
- Temporada do ano, especialmente se a demanda do produto ou serviço varia sazonalmente;
- Linha de produção e/ou energia utilizada na operação.

O *benchmarking* (indicador de desempenho econômico) pode ser utilizado, quando disponível, para comparar um desempenho ótimo com o atual nos pontos de uso de energia significativo.

Benchmarking é a prática de determinar parâmetros de operação-chave de um sistema para fornecer pontos de comparação. É uma ferramenta valiosa para

acompanhar o desempenho do sistema, para identificar problemas, e para determinar a eficácia das alterações do sistema. A variação no fluxo de vapor com a produção e com as estações do ano também pode aumentar a perspectiva da análise de melhoria do sistema (HARREL, 1996).

Os *benchmarkings* mais utilizados para produção de vapor são os de custo unitário de produção que relaciona a quantidade de combustível consumido e seu preço para produzir um quilo de vapor, a eficiência energética da caldeira (relacionada com a quantidade de energia que a caldeira transfere do combustível para o vapor) e o consumo específico por produto (quantidade de vapor necessária para produção de uma unidade ou um quilo de produto) (ELETROBRAS, 2005a).

Depois da obtenção dos dados necessários para descrição do perfil energético do sistema de vapor, ou de outros sistemas energéticos, e da realização de uma inspeção por todas as instalações da planta, é possível identificar os pontos de maior consumo e com potencial para conservação de energia. As oportunidades principais para o aumento da eficiência energética em um sistema de vapor foram apresentadas através dos itens 6 a 9.

Todas as oportunidades identificadas devem ser avaliadas para determinar sua viabilidade técnica e econômica de implementação no processo. Além disso, como foi dito, é importante uma avaliação do rendimento energético através dos balanços energéticos das oportunidades identificadas, e assim, determinar os pontos de menor eficácia no uso da energia e, conseqüentemente de maiores perdas.

Alguns critérios podem ser incluídos para priorizar as oportunidades:

- Estimativas de economia de energia ou custo;
- Custo de implementação da oportunidade;
- Retorno do investimento, taxa interna de retorno, valor presente líquido;
- Facilidade de implementação da oportunidade;
- Duração do período de implementação;
- Possível segurança, saúde e questões ambientais;
- O impacto de Manutenção;
- O impacto da eficiência de produção.

Um resumo das áreas chaves de melhorias e possíveis ações para a diminuição dos desperdícios de energia estão listados no Quadro 4.

Geração
Controlar a temperatura dos gases da chaminé Minimizar excesso de ar na combustão Manter alta temperatura da água de alimentação Reduzir transferências de calor no costado da caldeira Melhorar o tratamento de água para minimizar as descargas da caldeira Retirar ao máximo a umidade da biomassa utilizada para combustão
Distribuição
Reparar vazamentos de vapor Garantir o isolamento da tubulação, válvulas, acessórios Implementar um programa de manutenção dos purgadores Purgar todo condensado, gases incondensáveis e ar nas linhas de vapor
Utilização
Reduzir a pressão nos pontos de consumo Automação dos controles do processo Limpeza e manutenção das áreas de troca térmica Buscar ponto ótimo de operação dos equipamentos do processo
Retorno do condensado
Otimizar a recuperação de condensado Utilizar condensado de alta pressão para gerar vapor flash Dimensionamento correto e isolamento das linhas de retorno Recuperar energia térmica das descargas e fluxos de águas residuais

Quadro 4. Resumo das áreas-chave para melhorias no sistema de vapor.

Fonte: U. S. Department of Energy (2006).

É recomendado priorizar as otimizações na utilização final do vapor, antes de atuar na geração, pois os ganhos nesta área são refletidos de modo ampliado na geração e não há risco de a geração ficar superdimensionada.

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

A linha de base energética é obtida a partir da revisão energética e serve como uma referência para as mudanças futuras no desempenho energético. Melhorias no desempenho serão determinadas pela comparação dos indicadores atuais com os valores iniciais da linha de base energética. A linha de base facilita a

comparação do desempenho energético atual com o desempenho da organização antes de iniciar o sistema de gestão de energia. Tipicamente ela engloba o período de tempo de um ano.

Depois que os dados de energia foram coletados e analisados, os pontos de consumo significativo determinados, e as oportunidades de conservação de energia identificadas com maior margem de melhoria priorizadas, os próximos passos são definir os objetivos e metas energéticas, e desenvolver o plano de ação adequado para cumpri-las.

Objetivos energéticos são desenvolvidos utilizando as políticas e estratégias da organização, bem como as oportunidades identificadas. Definir as metas de energia envolve decidir sobre as medidas específicas necessárias para a organização cumprir os seus objetivos energéticos. Já o plano de ação, defini as atividades, recursos e responsabilidades necessárias para atender os objetivos e metas. Juntos, os objetivos, metas e plano de ação constituem a engrenagem da melhoria contínua do desempenho energético da organização.

O SGE requer que a organização defina e documente os objetivos e metas de energia para ajuda-la a cumprir o seu compromisso firmado na política de energia no que diz respeito à melhoria do desempenho energético.

Objetivos energéticos proporcionam um foco para as estratégias no desenvolvimento das atividades que visam alcançar resultados. As metas surgem de um objetivo energético, e definem os requisitos e quantidades específicas de desempenho energético que precisa ser atendido, a fim de atingir um objetivo.

Depois de estabelecer os objetivos energéticos e definir as metas, a organização determina como vai alcançá-las. Isso envolve a revisão da lista de oportunidades de conservação de energia priorizadas e seleção de projetos para a implementação com maior viabilidade econômica, e que melhor se adequem para o cumprimento das metas de energia planejadas.

Em seguida, um plano de ação deve ser desenvolvido para cada projeto. Um bom plano considera os recursos e inclui planejamento, execução, verificação e comunicação. Além disso, deve definir quais as atividades a serem concluídas, os recursos necessários para completa-las, as pessoas responsáveis para sua conclusão e como a verificação dos resultados e melhorias serão feitos.

11.3 GERENCIANDO A IMPLANTAÇÃO DOS RESULTADOS PLANEJADOS

Esta etapa trata da implementação dos resultados do processo de planejamento, usando mecanismos que fazem parte da gestão de energia das operações diárias de uma organização. Estes mecanismos incluem a formação, competência e consciência, documentação, controles operacionais, comunicação, bem como novas tecnologias e aquisições que podem influenciar no desempenho energético.

Os itens implementados nessa etapa incluem gestão dos pontos de consumo significativo, dos requisitos legais relacionados com energia e melhorias através dos planos de ação.

A informação que deve ser gerenciada e controlada é a que estabelece as expectativas para as ações e comportamentos da gestão de energia (documentos), e a que fornece evidências da eficácia dos esforços e dos resultados (registros).

Os documentos são informações que comunicam o que será feito ou como será feito, por exemplo, informações que definem os controles a serem aplicados em uma operação. Entre eles, estão incluídos:

- Definição do escopo e limitação do SGE;
- Como a organização irá atender os requisitos do SGE;
- A política energética;
- Metodologia e critérios utilizados para desenvolver a revisão energética;
- Metodologia para a determinação e atualização dos indicadores de desempenho.

Os registros são informações que demonstram resultados obtidos ou evidências de desempenho das atividades, por exemplo, o resultado do controle medido em um dia específico.

Se a organização já tem uma política de registros ou talvez um outro sistema de gestão em vigor (como ISO 9001, ISO 14001, etc), pode ser importante coordenar ou integrar o controle de registros do SGE com os registros existentes, de políticas e controles.

Em resumo, os registros fornecem as informações necessárias para demonstrar que a organização está fazendo o que diz que vai fazer, e para determinar a eficácia do sistema, incluindo as melhorias no desempenho energético. Documentos definem as expectativas para o SGE e fornece informações para realização das responsabilidades de trabalho. Portanto, o controle da informação é importante para o sucesso de um sistema de gestão de energia.

Controles operacionais asseguram que equipamentos, sistemas, processos e instalações críticas sejam executados e mantidos para alcançar a racionalização do consumo e um desempenho eficiente. Para estabelecer esses controles, critérios operacionais (*set-points*) são estabelecidos. Os pontos de consumo significativo devem ter *set-points* para operar eficientemente respondendo as condições do processo. Um exemplo de *set-point* é a pressão da caldeira. Estão incluídos nos controles operacionais também práticas de manutenção, como por exemplo lubrificação, ou reparo de vazamentos.

Geralmente, os critérios de operação e manutenção são implementadas através de treinamento, comunicação e documentação. Podem ser incluídas instruções de trabalho, banco de dados de equipamentos, folhas de instruções, *check-lists*, mensagens, ou outros documentos relevantes. Estes documentos devem estar sempre disponíveis. Muitas vezes, inspeções regulares são usadas para confirmar que os controles operacionais estão sendo seguidos e os critérios cumpridos.

O gerenciamento das novas tecnologias refere-se ao desenvolvimento de projetos de inovação, ou de mudanças nas instalações existentes, equipamentos e processos que podem ter um impacto considerável sobre o desempenho energético.

Qualquer instalação, equipamento, sistema ou processo que esteja dentro do âmbito do SGE que pode afetar significativamente o desempenho de energia deve ser avaliado no projeto. Isto significa que as oportunidades de melhoria de desempenho energético, controles operacionais, renovação ou modificação desses itens e o consumo são considerados no projeto. Um registro dos resultados das atividades do projeto deve ser mantido.

11.4 MONITORAMENTO E VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO

O sistema deve ser verificado regularmente para assegurar o cumprimento dos requisitos do sistema de gestão de energia, a eficácia da gestão das melhorias no desempenho energético, e o cumprimento das atividades de acordo com o planejamento estabelecido.

Esta etapa garante que as atividades apropriadas de monitoramento e medição estão sendo realizadas e que o sistema de gestão de energia está operando alinhado com a política de energia e alcançará os objetivos planejados.

Devem estar incluídos nas atividades desta etapa o monitoramento, medição e análise das características chave, a calibragem regular dos equipamentos de medição, a avaliação da conformidade com os requisitos legais e o planejamento e condução de auditorias internas para corrigir e/ou prevenir não-conformidades.

Características chave são variáveis específicas que determinam o desempenho de energia de uma organização. Estas características são usadas como parâmetros para determinar o monitoramento, medição e análise regular do desempenho energético, e confirmam a operação com a máxima eficiência, detectam a redução do desempenho e verificam o efeito de atividades de melhoria.

Muitos dos dados coletados no item 12.2 constituem a base das principais características, que incluem os pontos de consumo significativo, indicadores de desempenho energético, fontes energéticas e o consumo passado e presente, eficácia do plano de ação quanto ao cumprimento das metas e objetivos, o consumo real *versus* o consumo esperado e as oportunidades de conservação de energia.

Para garantir o monitoramento, medição e análise destas características deve ser definido e implementado um plano de medição de energia, que defini, organiza e documenta as atividades de monitoramento e medição. O plano deve incluir:

- Especificação dos sistemas, processos ou equipamentos a serem monitorados ou medidos;
- Frequência de coleta de dados;
- Método de coleta;
- Descrição do processo de análise de dados;
- Requisitos de calibração.

As características chave determinam o desempenho energético, e os dados recolhidos através do monitoramento e medição desses atributos é usado para identificar desvios significativos. Um desvio pode ser identificado por um nível específico de variação ou pode ser avaliado por pessoas qualificadas para

determinar se ela é significativa e se é necessário agir. Desvios significativos podem representar melhorias, bem como uma diminuição no desempenho da energia.

Uma auditoria interna é um processo sistemático, independente e documentado para recolher e avaliar objetivamente evidências e assim determinar se um conjunto de requisitos está sendo cumprido. Neste caso, os requisitos envolvidos são os requisitos da organização para seu sistema de gestão de energia.

Se a organização tem um programa de auditoria interna para outro sistema de gestão, então deve ser integrado aos processos existentes.

A auditoria interna é um elemento crítico do sistema de gestão. É o processo principal utilizado pela organização para verificar se o sistema de gestão da energia:

- Atende aos requisitos e arranjos que a organização estabeleceu para seu sistema de gestão de energia;
- Seja efetivamente implementado e mantido;
- Está de acordo com os objetivos e metas de energia;
- Resulta em melhoria do desempenho energético.

Em outras palavras, as auditorias internas avaliam tanto o desempenho energético quanto a eficácia da implementação do sistema de gestão, e ajudam a identificar as áreas de sucesso e as que necessitam de melhorias.

Quando uma não conformidade é detectada, o primeiro passo é tomar as medidas adequadas para resolver a situação. O próximo passo é determinar a magnitude da não conformidade e o seu impacto no desempenho de energia. Geralmente, isso envolve a consideração do grau de não conformidade e os seus efeitos reais e potenciais, por exemplo, sobre:

- Objetivos energéticos, metas e planos de ação;
- Pontos de consumo significativos;
- Operações existentes ou planejadas de controle ou manutenção;
- Outras fontes de energia ou energia consumida na organização.

As melhorias na gestão energética e no desempenho energético é o foco de um sistema de gestão. Portanto, a organização deve ter um processo para revisar e avaliar periodicamente o seu desempenho energético e o sistema de gestão de energia para identificar oportunidades de melhorias.

A análise e avaliação são realizadas na forma de revisão da gestão, e tem como objetivo garantir a melhoria contínua, adequação e eficácia do SGE. Isto é realizado através da análise de informações específicas (*inputs*) sobre o sistema e seu desempenho.

As decisões tomadas durante a revisão da gestão levam a ações que garantem a melhoria contínua do desempenho de energia e do sistema de gestão de energia. Para cada decisão, a organização precisa determinar quais ações devem ser tomadas, quem é responsável pelas ações e quando elas devem ser concluídas.

Estas decisões e ações relacionadas efetivamente iniciam o ciclo de melhoria contínua. Neste momento da implementação, pode ser necessário voltar as etapas anteriores e rever os critérios para os pontos de utilização de energia significativos, os fatores utilizados para priorizar as oportunidades de conservação e os dados que estão sendo coletados sobre as características-chave para garantir que eles se alinham com as prioridades atuais. Além disso, os itens para os quais a alta direção é responsável devem ser revistas para garantir que ela permaneça ativamente engajada na melhoria contínua do desempenho energético e do sistema de gerenciamento de energia.

12 CONCLUSÃO

Diante do histórico de consumo intensivo de insumos energéticos pelo setor industrial, torna-se essencial disponibilizar um guia que oriente na tomada de decisões de racionalização e eficiência na geração, distribuição e utilização do vapor, através da implantação de um programa sistemático de conservação e gerenciamento de energia que proporcione o aumento da competitividade e o uso eficaz dos recursos naturais e energéticos.

Além disso, a aplicação de análises termo-econômicas em plantas térmicas tem por base análises mais apuradas que relacionam o potencial de aproveitamento de resíduos e perdas no processo. Neste sentido, a análise exergética ajuda a apontar as principais fontes de desperdício e assim, priorizar as oportunidades de conservação de energia com maior margem para melhorias.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 50001:2011**. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=087286>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

AMIR, Vosough. **Improving Steam Power Plant Efficiency Through Exergy Analysis: Ambient Temperature**. In: 2nd International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering. Singapura, 2012.

ASME. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code; Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers**. Section VII. New York, 2001.

ATKINSON, Anthony. A. et al. **Contabilidade gerencial**. Tradução de André Olímpio Mosselman Du Chenoy Castro. São Paulo: Atlas, 2000.

BABCOCK & WILCOX. **Steam: Its Generation and Use**. New York: Babcock & Wilcox, 1985.

BAEHR, Hans D. **Thermodynamics**. 6 ed. New York: Springer-Verlag, 1988.

BALESTIERE, José A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BARRIGA, Alfredo. **Auditoria energética de un sistema de vapor**. Ministerio de Energia: Dirección de energía Alternativa y Eficiencia Energeticos. Equador, 2012.

BARROS, Robledo W.; ARADAS, Maria E. C.; COBAS, Vladimir R. M.; LORA, Electo E. S. **Uso de biomassa como combustível para acionamento de motores stirling**. In: 5º Agrener - Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída. Campinas, 2004.

BATISTA, Oureste E. **Gestão energética industrial: Uma abordagem frente à inteligência empresarial**. 2011. 86p. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica – Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1997.

BEN-2003. **Balço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, 2003.

BEN-2012. **Balço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, 2012.

BCS, Incorporated. **Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry**. U.S. Department of Energy. 2008. 112p.

BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Notas de aula: Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2012.

BORROTO, Aníbal. Ahorro de Energía en Sistemas de Vapor. **Editorial Universidad de Cienfuegos**, p. 25-28, Cuba, 2005.

BRASIL. **Ministério do Trabalho**. Portaria nº 23, de 27 de dezembro de 1994. Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13) para caldeiras e vasos de pressão. Brasília, DF, 1994.

BRIANE, Dominique; DOAT, Jacqueline. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence: ÉDISUD, 1985.

BRIGHAM, Eugene F. **Administração financeira: teoria e prática**. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

CAPEHART, Barney L.; SPILLER, Mark B.; FRAZIER, Scott. **Energy Management Handbook**. 6 ed., Lilburn: The Fairmont Press, 2006.

CAPEHART, Barney L.; TURNER, Wayne C.; KENNEDY, William J. **Guide to Energy Management**. 5 ed., Lilburn: The Fairmont Press, 2005.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKKE, Bruno H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. São Paulo: Atlas, 2008.

CASSIOLATO, César. **Medição de pressão: características, tecnologias e tendências.** Artigos Técnicos SMAR, São Paulo, 2010.

CASSIOLATO César; ORELLANA, Evaristo. **Medição de Vazão.** Artigos Técnicos SMAR, São Paulo, 2010.

CASTELETTI, Luís F. **Instrumentação industrial.** Apostila do Curso Técnico em Eletrônica - Colégio POLITEC. São Paulo, 2009

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** 5 ed. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

CERON, Luciano P. Controle do excesso de ar em processos de combustão. **Revista Meio Filtrante**, v.44, 2010.

CIBO. COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILER OWNERS. **Energy Efficiency Handbook.** Warreton, VA: CIBO, 1997.

COSTA ARAÚJO, Everaldo. C. **Trocadores de Calor.** São Carlos: EdUFSCar, 2002.

DALL'ORTO, Gibson. **Geradores de vapor.** Apostila CEFETS. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABhtQAL/5152-apostila-vapor-cefetes>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

DAMBROWSKI, Adrian; BRESSIANI, E. **Gestão financeira e custos.** Blumenau: EdFURB, 2008.

DAMODARAN, Aswath. **Avaliação de investimentos: ferramentas e técnicas para a determinação do valor de qualquer ativo.** 1 ed., Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

DE SWAAN ARONS, Jakob; VAN DER KOOI, Hedzer; SANKARANARAYANAN, Krishnan. **Efficiency and Sustainability in the Energy and Chemical Industries.** New York: Marcel Dekker, 2004.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND DEVELOPMENT PLANNING. **Fixing steam leaks.** Western Cape, AS: EADP, 2006.

DIAS, Rubens A.; BALESTIERI, José A. P. Energetic and Exergetic Analysis in a Firewood Boiler. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.12, n.23, p. 15-24, 2004.

DINCER, Ibrahim; ÇENGEL, Yunus. A. Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. **Entropy International Journal**, v.3, p. 116-149, 2001.

DINCER, Ibrahim; HUSSAIN, Mohammed M.; AL-ZAHARNAH, Iyad. Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia. **Energy Policy**, n.33, p. 1461-1467, 2005.

DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. **Energy, Environment and Sustainable Development**. London: Elsevier Science Publishing Company, 2008.

DUCLÓS, Luiz C.; SANTANA, Valdinei L. **Ciclo estratégico da informação: como colocar a TI no seu devido lugar**. Curitiba: Champagnat, 2009.

EINSTEIN, Dan; WORRELL, Ernst; KHRUSCCH, Marta. **Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials**. Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California. California, 2001.

ELETROBRAS. Guia Técnico: **Gestão energética**. ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005a.

_____. Manual Prático: **Eficiência energética no uso de vapor**. ELETROBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO Universidade federal de Itajubá – UNIFEI FUPAI. Itajubá, 2006.

_____. **Eficiência Energética: Teoria & Prática**. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO Universidade federal de Itajubá – UNIFEI FUPAI. Itajubá, 2007.

FERNANDES, Fabiano A. N.; PIZZO, Sandro M.; MORAES JUNIOR, Deovaldo. **Termodinâmica Química**. Ceará: UFC, 2006.

FIALHO, Arivelto. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. São Paulo: Érica, 2007.

FISCHER, James R.; BLACKMAN, Jordan E.; FINNELL, Janine A. Industry and Energy: Challenges and opportunities. **Engineering & Technology for a Sustainable World**, n.4, p. 8-9, 2007.

FLEAY, Brian J. **Energy quality and economic effectiveness**. Australian association for the study of peak oil and gas: ASPO Australia, 2005.

GASPAR, Carlos. **Eficiência energética na indústria**. Agência para energia: ADENE. Portugal: ADENE, 2004.

GEANKOPLIS, Christie J. **Transport Processes and Unit Operations**, 3rd edition. New York: Prentice-Hall Intern. Editions, 1998.

GODOI, José M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, Silvio. **Gestão da eficiência energética**. In: II International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2009.

HARRELL, Greg. **Steam System Survey Guide**. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 1996.

HERRING, Horace. Energy Efficiency – A critical view. **Energy**, v.31, p. 10-20, 2006.

HIRSCHFELD, Henrique. Engenharia econômica e análise de custos : aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores. São Paulo: Atlas, 2009.

HOSTRUP, Martin et al. Integration of thermodynamic insights and MINLP optimization for the synthesis, design and analysis of process flowsheets. **Computers and Chemical Engineering**. v. 25, 2001.

IBARZ, Albert; BARBOSA-CASANOVAS, Gustavo V. **Unit Operations in Food Engineering**. London: CRC Press, 2003.

IBP. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Curso sobre distribuição de vapor**. Rio de Janeiro: IBP, 1975.

INCROPERA, Frank. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JARA, Elias R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

KADANT. **Direct Steam Injection Water Heater**. Three Rivers, MI: KADANT, 2010.

KOTAS, Tadeuz J. Exergy concepts for thermal plant: First of two papers on exergy techniques in thermal plant analysis. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.2, n.3, p. 105-114, 1980.

KROLL, Ryan. **Boiler blowdown heat recovery**. Milwaukee, WI: Michaels Engineering, 2008.

KUZGUNKAYA, Ebru H.; HEPBASLI, Arif. Exergetic evaluation assesment of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet. **International Journal of Energy Research**, n.31, p. 245-258, 2007.

LEITE, Nilson R.; MILITÃO, Renato A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural: Prominp. São Paulo, 2008.

LORA, Electo E. S.; NOGUEIRA, Luís A. H. **Dendroenergia Fundamentos e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MARECHAL, François; HEYEN, Georges; KALITVENTZEFF, Boris. Energy savings in metanol synthesis: Use of heat integration techniques and simulation tools. **Computers and Chemical Engineering**,v.21, n.1, p.511-516, 1997.

MARTINELLI JUNIOR, Luiz C. **Geradores de Vapor – Recepção, Operação e Medidas de Segurança**. Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, n.8. Ijuí, RS: Editora Unijuí, 1998.

MENDES, Manoel E. S. S. **Metodologia para análise exergética-econômica de plantas a vapor para geração de eletricidade consumindo resíduo de biomassa amazônica**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Pará, Belém, 2009.

MILLAR, D. et al. **The Cambridge Dictionary of Scientists**. United Kingdom: Cambridge University Press, 1996.

MOHD, Halim S. I.; MUSTAFA, Kamal A. A.; NORR, Azian M. Review of Literature on Steam Accumulator Sizing in Palm Oil Mill. **European Journal of Scientific Research**. v.37, n.4, p.542-551, 2009.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NAKASHIMA, Celso Y. **Modelo do comportamento termodinâmico de bomba multifásica do tipo duplo parafuso**. 2000. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2000.

NASCIMENTO JUNIOR, Cleber M.; SARTORELLI, Ricardo J. Geração de energia por meio do vapor. **Coletânea de trabalhos – Qualidade de energia e tecnologias de uso final**, n.2, p.13-17, 2009.

ONOFRE, Reginaldo M. **Mecatrônica Atual – Automação Industrial de Processos e Manufatura: Automação em caldeiras: Válvulas de descarga de fundo e de nível**. Tatuapé, SP: Saber, 2011.

PALACIOS, José L. **Técnicas de gestión energética en sistemas de vapor**. Laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética – Escuela Politécnica Nacional. Quito, 2010.

PERRY, Jack A. Process Heating by Direct Steam Injection. **Processes Heating Magazine**, n.2, 1998.

PINHEIRO, Paulo C. C.; VALLE, Ramom M. **Controle de combustão: otimização do excesso de ar**. In: II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica. Rio de Janeiro, 1995.

RODRIGUES, Marcos L. M. **Curso Eficiência Energética em Sistemas de Vapor**. DATTE: Educação & Treinamento. Belo Horizonte, 2012.

ROSEN, Marc A.; DINCER, Ibrahim. Thermal storage and exergy analysis: the impact of stratification. **The Canadian Society for Mechanical Engineering**. v.23, 1999.

RUSSEL, John B. **Química Geral**. São Paulo: Makron, 2008.

SACHDEVA, Kiran B.; KARUN. Performance Optimization of Steam Power Plant through Energy and Exergy Analysis. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v.2, n.3, p.285-289, 2012.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Análise financeira de projetos**. Energy University – Brazilian Portuguese Courses. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com.br/brasil/pt/produtos-servicos/treinamento/energy-university/energy-university-course.page?>>. Acesso em: 20 nov. 2012.

SCHROYER, James A. **Understand the Basics of Steam Injection Heating**. Chemical Engineering Progress: Hydro-Thermal Corporation, 1997.

SILVA, Josias. **Análise Termoeconômica do Processo de Geração de Vapor e Potência do Segmento de Celulose e Papel**. 2002. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 2002.

SINGH, Paul R. **Energy in Food Processing**. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1986.

SPIRAX SARCO. **Design of Fluid Systems - Hook Ups**. Blythwood, SC: Spirax Sarco, 2000.

_____. **Design of Fluid Systems: Steam Utilization**. Blythwood, SC: Spirax Sarco, 2004.

_____. **Curso de Projetos de Sistema de Vapor**. Blythwood, SC: Spirax Sarco, 2005.

_____. **La industria cervecera: sistemas de vapor y condensado**. Blythwood, SC: Spirax Sarco, 2008.

_____. **The Steam and Condensate Loop Book**. Blythwood, SC: Spirax Sarco, 2011.

_____. **Drenagem de Condensado**. Disponível em: <<http://www.spiraxsarco.com/br/>>. Acesso em: 30 de ago. de 2012b.

_____. **Recuperação de Condensado e Vapor Flash**. Disponível em: <<http://www.spiraxsarco.com/br/>>. Acesso em: 30 ago. 2012a.

TELLES, Pedro C. S. **Tubulações Industriais**. 9 ed. Rio de Janeiro: S. A, 1999.

TRABACHINI, Aldie. **Termodinâmica e transferência de calor**. Apostila da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC. Tatuí, SP: FATEC, 2009.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2012.

URTADO, Edson S. et al. **Aplicação do método do valor presente líquido (VPL) na análise da viabilidade financeira de projetos na indústria metal mecânica: um estudo de caso**. In: XIII UNIC – Encontro Latino Americano de Iniciação Científica. São José dos Campos, 2009.

U. S. DAPARTAMENT OF ENERGY. **Steam Trap Performance Assessment**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 1999.

_____. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2000.

_____. **Best Practices: Steam Overview**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2002

_____. **How To Calculate The True Cost of Steam**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2003.

_____. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2004.

_____. **Best Practices: Steam**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2006.

_____. **DOE eGuide for ISSO 50001**. Advanced Manufacturing Office: AMO. Disponível em: < <https://ecenter.ee.doe.gov/EM/SPM/Pages/Home.aspx>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

UTLU, Zafer; HEPBASLI, Arif. Assesment of the energy and exergy utilization efficiencies in the Turkish agricultural sector. **International Jornal of Energy Research**, n.30, p. 659-670, 2006

VALENTAS, Kenneth J.; ROTSTEIN, Enrique; SINGH, Paul R.. **Handbook of Food Engineering Practice**. New York: CRC Press, 1997.

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

VOGT, Yeager. Top-down energy modeling. **Strategic Planning for Energy and the Environmental**, ed.1, v.24, p.66-80, 2004.

WANG, Lijun. **Food Efficiency and Management in Food Processing Facilities**. London: CRC Press, 2008.

WESSELS, Walter J. **Economia**. 3 ed., São Paulo: Saraiva, 2010.

WITTE, Larry C.; SCHMIDT, Philip S.; BROWN David R. **Industrial Energy Management and Utilization**. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1998.

ZANONI, Cícero. **Análise Exergética de um Forno a Arco**. 2004. 161 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Escola Católica do rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2004.

ANEXO A – Tabela de vapor saturado

1	2	3	4	5	6	7
Pressão Relativa	Pressão Aboluta	Temperatura	VOLUME Específico	Calor Sensível	Calor Total	Calor Latente
bar	bar	°C	m³/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
	0,01	6,7	131,7	6,7	600,1	593,0
	0,015	12,7	89,64	12,8	602,8	590,0
	0,02	17,2	68,27	17,2	604,8	587,4
	0,025	20,8	55,28	20,8	606,4	585,6
	0,03	23,8	46,53	23,8	607,7	583,9
	0,04	28,6	35,46	28,6	609,8	581,1
	0,05	32,5	28,73	32,5	611,5	578,9
	0,06	35,8	24,19	35,8	612,9	577,1
	,08	41,2	18,45	41,1	615,12	574,1
	0,10	45,4	14,95	45,4	617,0	571,6
	0,12	49,1	12,60	49,0	618,5	569,5
	0,15	53,6	10,21	53,5	620,5	567,0
	0,20	59,7	7,795	59,6	623,1	563,5
	0,25	64,6	6,322	64,5	625,1	560,6
	0,30	68,7	5,328	68,6	626,8	558,2
	0,35	72,2	4,614	72,2	628,2	556,0
	0,40	75,4	4,069	75,4	629,5	554,1
	0,50	80,9	3,301	80,8	631,6	550,8
	0,60	85,5	2,783	85,4	633,4	548,0
	0,70	89,5	2,409	89,4	634,9	545,5
	0,80	92,9	2,125	92,9	636,2	543,2
	0,90	96,2	1,904	96,2	637,4	541,2
0	1,0	99,1	1,725	99,1	638,5	539,4
0,1	1,1	101,8	1,578	101,8	639,4	537,6
0,2	1,2	104,2	1,455	104,3	640,3	536,0
0,3	1,3	106,6	1,350	106,7	641,2	534,5
0,4	1,4	108,7	1,259	108,9	642,0	533,1
0,5	1,5	110,8	1,180	110,9	642,8	531,9
0,6	1,6	112,7	1,111	112,9	643,5	530,6
0,8	1,8	116,3	0,995	116,5	644,7	528,2
1,0	2,0	119,6	0,902	119,9	645,8	525,9
1,2	2,2	122,6	0,826	123,0	646,9	524,0
1,4	2,4	125,5	0,7616	125,8	648,0	522,1
1,6	2,6	128,1	0,7066	128,5	649,1	520,4
1,8	2,8	130,5	0,6592	131,0	650,2	518,7
2,0	3,0	132,9	0,6166	133,4	650,3	516,9
2,2	3,2	135,1	0,5817	135,7	651,0	515,8
2,4	3,4	137,2	0,5495	137,8	651,7	514,3
2,6	3,6	139,2	0,5208	139,9	652,4	512,8
2,8	3,8	141,1	0,4951	141,8	653,1	511,3
3,0	4,0	142,9	0,4706	143,6	653,4	509,8
3,5	4,5	147,2	0,4224	148,1	654,6	506,7
4,0	5,0	151,1	0,3816	152,1	655,8	503,7
4,5	5,5	154,7	0,3497	155,9	656,8	501,2
5,0	6,0	158,1	0,3213	159,3	657,8	498,5
5,5	6,5	161,2	0,2987	162,7	658,6	496,1
6,0	7,0	164,2	0,2778	165,6	659,4	493,8
6,5	7,5	167,0	0,2609	168,7	660,1	491,6
7,0	8,0	169,6	0,2448	171,3	660,8	489,5
7,5	8,5	172,1	0,2317	174,0	661,4	487,5
8,0	9,0	174,5	0,2189	176,4	662,0	485,6
8,5	9,5	176,8	0,2085	179,0	662,5	483,7
9	10	179,0	0,1981	181,2	663,0	481,8
10	11	183,2	0,1808	185,6	663,9	478,3

11	12	187,1	0,1664	189,7	664,7	475,0
12	13	190,7	0,1541	193,5	665,4	471,9
13	14	194,1	0,1435	197,1	666,0	468,9
14	15	197,4	0,1343	200,6	666,6	466,0
15	16	200,4	0,1262	203,9	667,1	463,2
16	17	203,4	0,1190	207,1	667,5	460,4
17	18	206,1	0,1126	210,1	667,9	457,8
18	19	208,8	0,1068	213,0	668,2	455,2
19	20	211,4	0,1016	215,8	668,5	452,7
21	22	216,2	0,0925	221,2	668,9	447,7
23	24	220,8	0,0849	226,1	669,1	443,2
25	26	225,0	0,0785	230,8	669,3	438,7
27	28	229,0	0,0729	235,2	669,6	434,4
29	30	232,8	0,06802	239,5	669,7	430,2
31	32	236,3	0,06375	243,6	669,7	426,1
33	34	239,8	0,05995	247,5	669,6	422,1
35	36	243,0	0,05658	251,2	669,5	418,3
37	38	246,2	0,05353	254,8	669,3	414,5
39	40	249,2	0,05078	258,2	669,0	410,8
41	42	252,1	0,04828	261,6	668,8	407,2
43	44	254,9	0,04601	264,9	668,4	403,5
45	46	257,6	0,04393	268,0	668,0	400,0
47	48	260,2	0,04201	271,2	667,7	396,5
49	50	262,7	0,04024	274,2	667,3	393,1
54	55	268,7	0,03636	281,4	666,2	384,8
59	60	274,3	0,03310	288,4	665,0	376,6
64	65	279,5	0,03033	294,8	663,6	368,8
69	70	284,5	0,02795	300,9	662,1	361,2
74	75	289,2	0,02587	307,0	660,5	353,5
79	80	293,6	0,02404	312,6	658,9	346,3
84	85	297,9	0,02241	318,2	657,0	338,8
89	90	301,9	0,02096	323,6	655,1	331,5
94	95	305,8	0,01964	328,8	653,2	324,4
99	100	309,5	0,01845	334,0	651,1	317,1
109	110	316,6	0,01637	344,0	646,7	302,7
119	120	323,2	0,01462	353,9	641,9	288,0
129	130	329,3	0,01312	363,0	636,6	273,6
139	140	335,1	0,01181	372,4	631,0	258,6
149	150	340,6	0,01065	381,7	624,9	243,2
159	160	345,7	0,00962	390,8	618,3	227,5
179	180	355,3	0,00781	410,2	602,5	192,3
199	200	364,1	0,00620	431,5	582,3	150,8

Fonte: Spirax Sarco (2005).

ANEXO B – Avaliação da eficiência energética e exergética

A avaliação da eficiência energética e exérgica de um volume de controle podem ser realizadas quantificando e qualificando os fluxos energéticos que atravessam sua fronteira. Estes são parâmetros de desempenho essenciais para determinar os pontos de perda de energia passíveis de melhoria. Balanços de massa, energia e exergia, baseados na termodinâmica, são utilizados para realizar essa contabilidade.

A Figura B.1 ilustra o volume de controle que será analisado. Ela mostra o esquema de um sistema de evaporação de múltiplo efeito em três estágios e as correntes de massa e energia que atravessam sua fronteira.

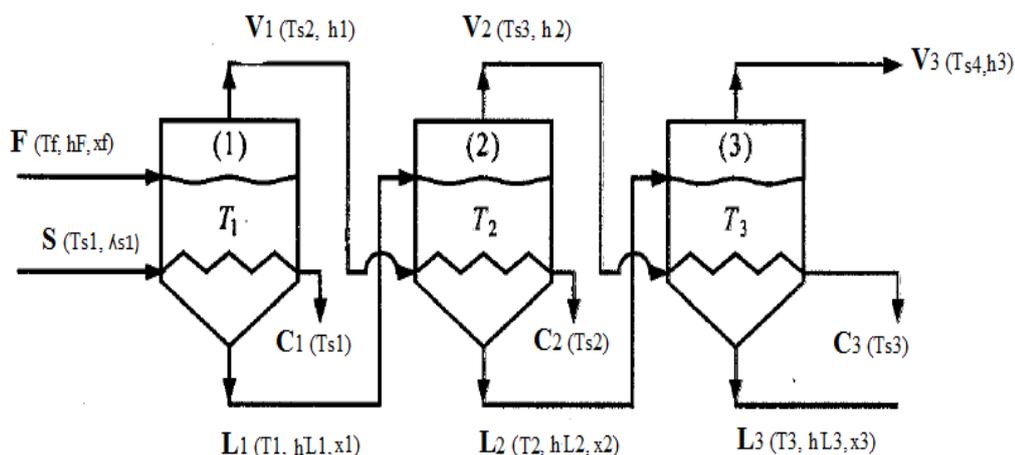


Figura B.1. Volume de controle e as correntes de fluxo que atravessam sua fronteira

No sistema de evaporação de múltiplo efeito, cada efeito atua como um evaporador de efeito simples. No primeiro efeito é utilizado vapor vivo (S) com temperatura (T_{s1}) e calor latente (λ_{s1}). A alimentação (F) do produto que se deseja evaporar se dá a temperatura (T_f) com percentual de sólidos (x_f) e entalpia (h_F). O vapor extraído do primeiro efeito (V1) é utilizado como meio de aquecimento no segundo efeito a temperatura (T_{s2}), calor total (h_1) e calor latente (λ_{s2}). Os condensados dos vapores no primeiro, segundo e terceiro efeitos são representados por (C1, C2 e C3) a temperatura (T_{s1} , T_{s2} e T_{s3}) e calor sensível (h_{s1} , h_{s2} e h_{s3}), respectivamente. As correntes (L1, L2 e L2) representam o produto concentrado

com percentuais de sólidos (x_1 , x_2 e x_3) a temperatura (T_1 , T_2 , T_3) entalpias (h_{L1} , h_{L2} , h_{L3}), respectivamente. Para transferir calor latente do vapor no segundo efeito a temperatura de ebulição (T_2) deve ser inferior à temperatura de condensação (T_{s2}). De forma similar, o vapor do segundo efeito (V_2) se condensa ao aquecer o terceiro efeito a (T_{s3}), calor total (h_2) e calor latente (λ_{s3}). O vapor (V_3) a temperatura (T_{s4}) e calor total (h_3) geralmente é condensado fora do equipamento.

Para as análises do sistema global a Figura B.2 ilustra o esquema utilizado.

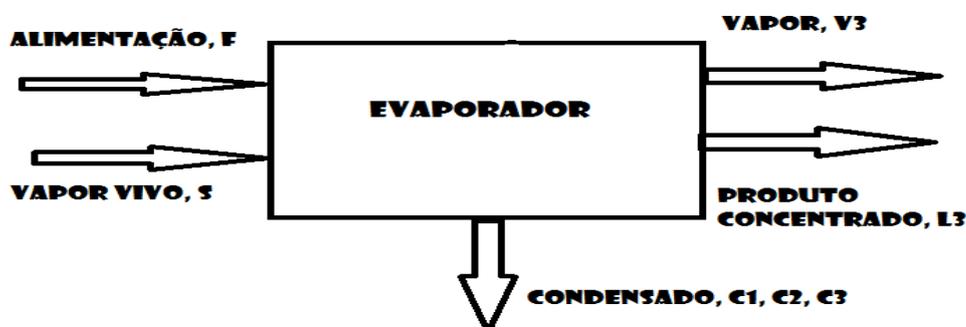


Figura B.2. Volume de controle para análise global

Para a solução dos balanços de massa, energia e exergia propostos todas as variáveis do processo deverão ser conhecidas. As entalpias (conteúdo calorífico) poderão ser obtidas através das tabelas de vapor e os calores específicos das soluções a serem concentradas obtidas em bibliografia específica.

I. Balanço de Massa:

O balanço de massa global do volume de controle operando em regime permanente é equacionado pelas expressões:

$$\sum_e m_e = \sum_s m_s \quad (20)$$

$$F = L3 + (V1 + V2 + V3) \quad (B.2)$$

$$F \cdot x_f = L3 \cdot x_3 \quad (B.3)$$

O somatório de V1, V2 e V3 indica a quantidade de água evaporada durante a operação.

Durante a transferência do calor latente do vapor ele se condensa devendo ser purgado para fora do sistema. Portanto, as correntes de condensado serão iguais as correntes de vapor do efeito anterior. Assim: S=C1; V1=C2 e V2=C3. Então, para cada efeito o balanço de massa é dado por:

Efeito 1:

$$F = V1 + L1 \quad (B.4)$$

$$F \cdot x_f = L1 \cdot x1 \quad (B.5)$$

Efeito 2:

$$L1 = V2 + L2 \quad (B.6)$$

$$L1 \cdot x1 = L2 \cdot x2 \quad (B.7)$$

Efeito 3:

$$L2 = V3 + L3 \quad (B.8)$$

$$L2 \cdot x2 = L3 \cdot x3 \quad (B.9)$$

II. Balanço de Energia

Para o desenvolvimento do balanço algumas considerações devem ser feitas. A operação do evaporador se dá regime permanente, é possível desprezar as energias cinéticas e potenciais dentro do sistema, o trabalho é nulo e é admitido que não há transferência de calor na superfície de controle, sendo desprezadas perdas de calor por radiação e convecção. Dessa forma, o balanço de energia do volume de controle pode ser descrito pelas equações a seguir:

$$\sum_e m_e \cdot h_e = \sum_s m_s \cdot h_s \quad (B.10)$$

Efeito 1:

$$F \cdot hF + S \cdot \lambda_{s1} = L1 \cdot hL1 + V1 \cdot h1 \quad (B.11)$$

Efeito 2:

$$L1 \cdot hL1 + V1 \cdot \lambda_{s2} = L2 \cdot hL2 + V2 \cdot h2 \quad (B.12)$$

Efeito 3:

$$L2 \cdot hL2 + V2 \cdot \lambda_{s3} = L3 \cdot hL3 + V3 \cdot h3 \quad (B.13)$$

Através dos resultados obtidos é possível conhecer a quantidade de energia transferida em cada corrente dentro do volume de controle. Assim, pode ser feita uma análise das transferências energéticas resultando no balanço global do sistema:

$$S \cdot \lambda_{s1} + F \cdot hF = C2 \cdot h_{s2} + C3 \cdot h_{s3} + L3 \cdot hL3 + V3 \cdot h3 \quad (B.14)$$

A eficiência energética do sistema é dada por:

$$\varphi = \frac{(Energia)_{sai \text{ como produto}}}{Energia_{entra}} \quad (31)$$

$$\varphi = \frac{L1 + L2 + L3}{S \cdot \lambda_{s1}} \quad (B.15)$$

III. Balanço de Exergia

Antes de iniciar o balanço é preciso fazer algumas considerações. O volume de controle opera em regime permanente, as energias cinéticas e potenciais são desprezíveis, o trabalho é nulo e, é admitido que não há transferência de calor na superfície de controle. As condições ambientais consideradas são $T_0=250C$ e $P_0=1atm$. Assim, o balanço de exergia para o evaporador em cada efeito é dado por:

Efeito 1

$$\sum_e m_e \cdot ef_e = \sum_s m_s \cdot ef_s + \dot{E}d_1 \quad (B.16)$$

$$F \cdot ef_f + S \cdot ef_s = L1 \cdot ef_{L1} + V1 \cdot ef_{v1} + C1 \cdot ef_{c1} + \dot{E}d_1 \quad (B.17)$$

Onde, $\dot{E}d_1$ é taxa de destruição de exergia no efeito 1 e ef é a exergia de fluxo com subscrito indicando a corrente.

Efeito 2:

$$\sum_e m_e \cdot ef_e = \sum_s m_s \cdot ef_s + \dot{E}d_2 \quad (B.18)$$

$$L1 \cdot ef_{L1} + V1 \cdot ef_{v1} = L2 \cdot ef_{L2} + V2 \cdot ef_{v2} + C2 \cdot ef_{c1} + \dot{E}d_2 \quad (B.19)$$

Onde, $\dot{E}d_2$ é taxa de destruição de exergia no efeito 2.

Efeito 3

$$\sum_e m_e \cdot ef_e = \sum_s m_s \cdot ef_s + \dot{E}d_3 \quad (B.20)$$

$$L2 \cdot ef_{L2} + V2 \cdot ef_{v2} = L3 \cdot ef_{L3} + V3 \cdot ef_{v3} + C3 \cdot ef_{c3} + \dot{E}d_3 \quad (B.21)$$

Onde, $\dot{E}d_3$ é taxa de destruição de exergia no efeito 3.

Através dos resultados obtidos com as equações acima é possível contabilizar os fluxos de exergia transferida em cada corrente dentro do volume de controle. Assim, uma análise das transferências exergéticas pode ser feita, resultando no balanço global do sistema:

$$\sum_e m_e \cdot ef_e = \sum_s m_s \cdot ef_s + \dot{E}d \quad (B.22)$$

$$F \cdot ef_f + S \cdot ef_s = L3 \cdot ef_{L3} + V3 \cdot ef_{v3} + C1 \cdot ef_{c1} + C2 \cdot ef_{c2} + C3 \cdot ef_{c3} + \dot{E}d \quad (B.23)$$

$$\dot{E}d = \sum_e m_e \cdot ef_e - \sum_s m_s \cdot ef_s = \sum_n \dot{E}d_n \quad (B.24)$$

Onde, n é número de efeitos.

A eficiência exergética do sistema é dada por:

$$\psi = \frac{(Exergia)_{sai\ como\ produto}}{Exergia_{entra}} \quad (32)$$

$$\psi = \frac{L1.ef_{L1} + L2.ef_{L2} + L3.ef_{L3}}{S.ef_s} \quad (B.25)$$

Os resultados obtidos com as análises de desempenho devem ser comparados com a literatura existente para o volume de controle. A partir desse perfil energético poderá ser identificada a magnitude real das perdas de energia, além dos pontos de desperdício. Com isso, um estudo deve ser conduzido para recomendação de medidas de racionalização ou tecnologias de conservação de energia disponíveis para o volume de controle. A implementação de possíveis melhorias no sistema deve passar por uma avaliação técnica e econômica.

Anexo C – Análise financeira de projetos

Projetos de eficiência energética devem passar por avaliações financeiras para determinar sua viabilidade de implementação, permitindo priorizar investimentos com maior margem de benefícios. A seguir, é apresentado um exemplo prático de análise financeira de dois projetos de eficiência energética (SCHNEIDER ELETRIC, 2012). Ao se obter os indicadores financeiros (*payback*, VPL, TIR), é possível escolher o investimento mais lucrativo para empresa.

Os projetos (A e B) serão avaliados com base nos valores apresentados na Tabela C.1, referente aos investimentos iniciais e futuras economias de energia estimadas. O custo de capital considerado é de 10%.

Tabela C.1. Dados para análise financeira de projetos

Projeto A	Fluxo de Caixa	Projeto B	Fluxo de Caixa
Ano	Nominal (\$)	Ano	Nominal (\$)
0	-100.000	0	-80.000
1	20.000	1	40.000
2	40.000	2	40.000
3	40.000	3	20.000
4	60.000	4	10.000
5	60.000	5	5.000

Foram criadas as tabelas de fluxo de caixa descontado para contabilizar o valor variável do dinheiro no tempo. Em seguida, determinado o período de retorno do investimento, o valor atual líquido e a taxa interna de retorno, para cada projeto. As equações utilizadas para definir estes parâmetros estão apresentadas no item 9.2 deste trabalho. Os resultados são apresentados nas Tabelas C.2 e C.3.

Tabela C.2. Resultados para análise do projeto A.

Projeto A	Fluxo de Caixa	Acumulado FCN	Fluxo de Caixa	Acumulado FCD
Ano	Nominal (\$)	(\$)	Descontado (\$)	(\$)
0	-100.000	-100.000	-100.000	-100.000
1	20.000	-80.000	18.200	-81.800
2	40.000	-40.000	33.100	-48.800
3	40.000	0	30.100	-18.700
4	60.000	60.000	41.000	22.300
5	60.000	120.000	37.300	59.500

Tabela C.3. Resultados para análise do projeto B.

Projeto B	Fluxo de Caixa	Acumulado FCN	Fluxo de Caixa	Acumulado FCD
Ano	Nominal (\$)	(\$)	Descontado (\$)	(\$)
0	-80.000	-80.000	-80.000	-80.000
1	40.000	-40.000	36.400	-43.500
2	40.000	0	33.100	-10.600
3	20.000	20.000	15.000	-4.400
4	10.000	30.000	6.800	11.300
5	5.000	35.000	3.100	14.400

Portanto, o projeto A atinge o ponto de equilíbrio em 3 anos, período este, correspondente ao tempo de retorno do investimento (*payback* simples). Um VPL de \$59,5 mil e TIR de 27,6%. Para o projeto B o *payback* simples é de 2 anos, VPL de \$14,4 mil e TIR de 19,6%.

Estes indicadores devem ser cuidadosamente analisados para que seja tomada uma decisão quanto ao investimento com maior retorno e assim priorizar projetos com maior chance de aprovação.

Se a análise financeira se restringisse a utilização apenas do *payback* simples, o projeto B seria o escolhido com uma recuperação de investimento mais rápida. Porém, ao utilizarmos o VPL e a TIR, o projeto A se torna mais vantajoso, com índices mais altos. Como estes parâmetros são indicadores financeiros mais sofisticados do que o *payback* simples, que não considera o valor variável do dinheiro no tempo, a escolha certa, que proporciona maior margem de benefícios é o projeto A.

Anexo D – Documentação exigida para um sistema de gestão energética

O Quadro D.1 apresenta todos os documentos e registros exigidos para implantação de um SGE baseado no padrão internacional ISO.

DOCUMENTOS		REGISTROS	
O que precisa ser documentado?	Nota	O que precisa ser registrado?	Nota
Escopo e limites do SGE.	Considere documentar este item dentro de um manual de energia. Eles também podem ser documentados como um documento independente.		
Política energética.	Considere documentar este item dentro de um manual de energia. Eles também podem ser documentados como um documento independente.		
Processo de planejamento energético.	Inclui: <ul style="list-style-type: none"> • Revisão das atividades da organização que podem afetar o desempenho energético; • Requisitos legais e/ou outros; • Linha de base; • Perfil energético; • Indicadores de desempenho energético; • Objetivos, metas e planos de ação da gestão energética. 		
Metodologia e critério utilizado para desenvolver a revisão energética.	Pode ser parte do documento de processo de planejamento energético.	Revisão energética	Inclui: <ul style="list-style-type: none"> • Fontes de energia • Dados de consumo energético do passado e do presente; • Pontos de consumo significativo (incluindo instalações, equipamentos, sistemas, processos, variáveis relevantes e desempenho atual e estimativa de consumo futuro); • Oportunidades de conservação de energia.
		Linha de base energética	
		Metodologia para determinar e atualizar os indicadores de desempenho energético.	Essa metodologia deve ser registrada. De forma alternativa pode ser integrada ao processo de planejamento energético.

DOCUMENTOS		REGISTROS	
O que precisa ser documentado?	Nota	O que precisa ser registrado?	Nota
Objetivos e metas do sistema			
Plano da ação de gerenciamento de energia	Inclui: <ul style="list-style-type: none"> • responsabilidades; • recursos e os prazos para as metas; • método de verificação melhoria do desempenho energético; • método de análise dos resultados da verificação. 		
		<ul style="list-style-type: none"> •Registros de competência; •Registros de necessidades de treinamento; •Registros de treinamentos. 	Incluem: certificados, diplomas, registros de frequência, etc.
Especificações da compra e fornecimento de energia			
		Resultados das atividades planejadas	
		Decisão que a empresa tomar sobre a comunicação externa do seu SGE e desempenho energético.	Pode ser documentada como um registro independente ou incorporada a outro registro do SGE.
Plano de medição de energia	O plano deve ser apropriado ao tamanho e complexidade da organização e listar o equipamento de medição e a forma de monitoramento.	Resultados da monitoração e medição das variáveis-chave	Variáveis-chave incluem: <ul style="list-style-type: none"> • Pontos de consumo significativos; • Outros pontos identificados na revisão de energia; • Variáveis relevantes relacionadas com os pontos de consumo significativo; • Indicadores de desempenho energético; • Eficácia dos planos de ação; • Avaliação do real consumo de energia <i>versus</i> esperado.
		Registros de calibração	
		Conformidade ou não dos requisitos legais aplicáveis ou outros requisitos	

DOCUMENTOS		REGISTROS	
O que precisa ser documentado?	Nota	O que precisa ser registrado?	Nota
Processo de auditoria interna	Auditoria interna segundo ISO 50001 é definida como um processo sistemático, independente e documentado para obter evidências e avaliá-las objetivamente para determinar a extensão em que os requisitos estão sendo cumpridos.		
Cronograma e plano de auditoria	Auditorias devem ser realizadas em intervalos planejados. Cronograma e o plano de auditoria devem considerar status, importância e os resultados das auditorias anteriores.		
		Registro dos resultados da auditoria	Os resultados da auditoria devem ser registrados em um relatório.

Quadro D.1 Documentação exigida para implantação da ISO 50001.

Fonte: U.S. Department of Energy (2013).