



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

MÜLLER DE ALMEIDA SOUSA

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM UM SISTEMA DE VAPOR  
INSTALADO EM UMA EMPRESA DO PÓLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

MANAUS - AM

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

MÜLLER DE ALMEIDA SOUSA

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM UM SISTEMA DE VAPOR  
INSTALADO EM UMA EMPRESA DO PÓLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Msc. Carlos José Machado.

MANAUS - AM

2017



MÜLLER DE ALMEIDA SOUSA

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM UM SISTEMA DE VAPOR  
INSTALADO EM UMA EMPRESA DO PÓLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Msc. Carlos José Baptista Machado.

Aprovado em \_\_\_ / \_\_\_ /201\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. MSc. Carlos José Baptista Machado  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Presidente Banca Examinadora

---

Prof. ESp. José Francisco de Caldas Costa  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Membro Examinador

---

Prof<sup>a</sup>. MSc. João Nery Rodrigues Filho  
Instituto Federal do Amazonas – IFAM  
Membro Examinador



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMAZONAS

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, por ter me concedida o dom da vida e ter me preservado até esse momento. Também o dedico a minha amada e querida mãe, Raimunda de Almeida Sousa, por ter me criado, amado, educado e apoiado sempre e incondicionalmente, e a minha esposa, Silvana de Moura Sousa, e filha, Sarah Nubia de Moura Sousa, pelo apoio, cuidado e amor que me dão.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pois sem sua ajuda, bênçãos e proteção não estaria vivenciando esse momento.

A meus pais, em especial, minha mãe, Raimunda de Almeida Sousa, por, apesar das dificuldades e sacrifícios, terem me criado, acreditado e investido em minha educação.

A minha esposa e filha, Silvana e Sarah de Moura Sousa, por todo o apoio, incentivo e carinho para continuar sempre em frente.

Ao corpo docente desta instituição, por toda a dedicação e paciência ao nos ensinar.

Ao meu orientador, José Carlos Machado, e a Professora, Andréa Regina Leite do Nascimento, por terem me ajudado, com suas orientações e ensinamentos, a não perder o foco e permanecer no caminho certo para finalizar este trabalho.

A todos os colegas discentes e demais funcionários desta instituição que, de alguma forma, colaboraram para que esse momento acontecesse.



## RESUMO

Este trabalho contém um estudo para se determinar a melhor forma de reaproveitamento energético em um sistema de vapor instalado numa empresa do Pólo Industrial de Manaus, mostrando a atual situação dos sistemas de retorno de condensado, indicando as medidas a serem tomadas e orientando os investimentos. Para isso foi feito um levantamento de uma série de dados imprescindíveis ao estudo junto à empresa, uma inspeção dos sistemas de retorno de condensado e um estudo para identificar o melhor sistema de reaproveitamento dessa energia térmica, os quais indicaram o sistema de reaproveitamento com trocador de calor como o mais apropriado para a situação em questão, pois proporcionaria uma grande economia de combustível e um considerável aumento de temperatura na água de alimentação da caldeira.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento energético, Sistema de vapor, Sistemas de retorno de condensado, Sistema de reaproveitamento com trocador de calor, vapor flash.



## ABSTRACT

This work contains a study to determine the best way to reuse energy in a steam system installed in the company of the industrial pole of Manaus, showing a current situation of condensate return systems, indicating as measures and taking and guiding investments. For a moment, a survey of a series of data essential to the study with a company, a system of condensate return systems and a study to identify the best system of reutilization of this thermal energy, which indicated the system of reutilization with exchanger Of Heat as the most appropriate for such a situation as it would provide great fuel economy and a temperature rise in the boiler feed water.

**Keywords:** Energy recovery, Steam system, Condensate return systems, Reuse system with heat exchanger, flash steam.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1: Diagrama de fases da água.....                                                               | 13  |
| Figura 2: Caldeira horizontal e vertical.....                                                          | 17  |
| Figura 3: Caldeira aquatubular.....                                                                    | 18  |
| Figura 4: Caldeira flamobular.....                                                                     | 18  |
| Figura 5: Caldeira mista.....                                                                          | 19  |
| Figura 6: Sistema automático de TDS.....                                                               | 20  |
| Figura 7: Descarga de fundo automática.....                                                            | 21  |
| Figura 8: Materiais recomendados para tubulações de vapor.....                                         | 23  |
| Figura 9: Balanço de energia em um sistema de vapor.....                                               | 24  |
| Figura 10: Oportunidades de conservação de energia em um sistema de vapor.....                         | 25  |
| Figura 11: Efeitos da drenagem ineficiente ou incorreta.....                                           | 29  |
| Figura 12: Purgador para drenagem de linhas de vapor.....                                              | 30  |
| Figura 13: Pontos de instalação dos purgadores para drenagem de condensado.....                        | 30  |
| Figura 14: Principais tipos de purgadores e suas características de operação.....                      | 33  |
| Figura 15: Características dos purgadores.....                                                         | 34  |
| Figura 16: Emprego dos purgadores.....                                                                 | 35  |
| Figura 17: Espessura recomendada para o isolante lã de rocha.....                                      | 37  |
| Figura 18: Materiais usados para isolamento térmico externo.....                                       | 37  |
| Figura 19: Linhas de retorno alagadas.....                                                             | 39  |
| Figura 20: Quantidade de vapor flash em relação ao condensado.....                                     | 40  |
| Figura 21: Quantidade aproximada de energia contida no condensado.....                                 | 41  |
| Figura 22: Tanque de retorno de condensado da empresa em questão.....                                  | 43  |
| Figura 23: Gráfico para determinação de quantidade de vapor flash formado na<br>despressurização.....  | 44  |
| Figura 24: Esquema mostrando sistema de recuperação de vapor reevaporado com tanque.<br>.....          | 45  |
| Figura 25: Esquema mostrando sistema de recuperação de vapor reevaporado com trocador<br>de calor..... | 45  |
| Figura 26: Porcentagem de vapor flash formado em relação a queda de pressão.....                       | 46  |
| Figura 27: ilustração do condensador de vapor de exaustão, instalado em tanque.....                    | 47  |
| Figura 28: Trocador de calor EVC.....                                                                  | 48  |
| Figura 29: Comparativo entre os sistemas tradicional e com reaproveitamento.....                       | 49  |
| Figura 30: Gráfico da porcentagem de ganho com a implantação do sistema.....                           | 49  |
| Figura 31: Vapor despejado para a atmosfera.....                                                       | 50  |
| Figura 32: Resultados Falcão (2014).....                                                               | 51  |
| Figura 33: Resultados Sousa (2017).....                                                                | 501 |



## SUMÁRIO

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                          | 11 |
| 2. OBJETIVOS .....                                          | 12 |
| <b>2.1- Objetivo geral</b> .....                            | 12 |
| <b>2.2- Objetivos específicos</b> .....                     | 12 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO.....                                 | 13 |
| <b>3.1 Vapor</b> .....                                      | 13 |
| <b>3.2 Tipos de vapor</b> .....                             | 14 |
| <b>3.3 Eficiência energética em sistemas de vapor</b> ..... | 15 |
| <b>3.4 Produção e utilização de vapor</b> .....             | 16 |
| 3.4.1 <i>Tipos de caldeiras</i> .....                       | 17 |
| <b>3.5 Controle da qualidade do vapor</b> .....             | 19 |
| <b>3.6 Sistema de distribuição de vapor</b> .....           | 22 |
| <b>3.7 Perdas térmicas</b> .....                            | 24 |
| 3.7.1 <i>Perdas de calor para o ambiente</i> .....          | 26 |
| 3.7.2 <i>Perdas por vazamento</i> .....                     | 26 |
| 3.7.3 <i>Perdas na caldeira</i> .....                       | 26 |
| 3.7.4 <i>Perdas pelas tubulações</i> .....                  | 27 |
| 3.7.5 <i>Perdas nos purgadores</i> .....                    | 27 |
| 3.7.6 <i>Perda de carga</i> .....                           | 27 |
| <b>3.8 Purgadores</b> .....                                 | 28 |
| 3.8.1 <i>Instalação dos purgadores</i> .....                | 30 |
| 3.8.2 <i>Tipos de purgadores</i> .....                      | 31 |
| 3.8.3 <i>Escolha dos purgadores</i> .....                   | 33 |
| 3.8.4 <i>Manutenção e avaliação dos purgadores</i> .....    | 35 |
| <b>3.9 Isolamento térmico</b> .....                         | 36 |
| <b>3.10 Condensação e retorno de condensado</b> .....       | 38 |
| 3.10.1 <i>Sistema de retorno</i> .....                      | 38 |



|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.10.2 Tipos de retorno.....                                    | 38  |
| 3.10.3 Transporte do condensado .....                           | 39  |
| 3.10.4 Tanques de alimentação e de condensado.....              | 39  |
| 3.10.5 Aproveitamento de vapor flash.....                       | 40  |
| 4. METODOLOGIA.....                                             | 42  |
| 4.1 Dados coletados no levantamento .....                       | 42  |
| 4.2 Tanque de retorno de condensado.....                        | 43  |
| 4.3 Procedimento para cálculo da quantidade de vapor flash..... | 44  |
| 4.4 Formas de aproveitamento de vapor flash .....               | 45  |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                | 47  |
| 5.1 Vantagens com a utilização de trocadores de calor.....      | 48  |
| 5.2 Ganhos do sistema.....                                      | 500 |
| 5.3 Outros ganhos do sistema.....                               | 51  |
| 5.4 Comparação entre resultados.....                            | 52  |
| 6. CONCLUSÃO .....                                              | 52  |
| 7. REFERÊNCIAS .....                                            | 54  |

## 1 INTRODUÇÃO

Vapor é um meio de transmissão de energia térmica muito eficiente que praticamente é usado desde o início da industrialização, sendo utilizado em diversos processos industriais, além de ser de fácil obtenção.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (2002), a indústria converte cerca de 70% do combustível que adquire em vapor.

No Brasil, por exemplo, em 2012 estima-se que 54% do total da energia consumida na indústria, o que corresponde a 20% da demanda do país, tenha sido usada na geração de vapor.

Tendo em vista o grande uso do vapor pelas indústrias e como ainda não há um sistema termodinâmico com 100% de aproveitamento, ou seja, sempre ocorrerão perdas pelo caminho, faz-se necessário que as empresas que utilizam vapor em seu sistema produtivo avaliem sua eficiência e tomem as medidas necessárias para otimizá-la, pois o aumento cada vez maior da competitividade industrial motivada pelo fato de que, os consumidores de hoje querem mais e melhor pagando o menos possível por isso, tem levado as empresas a direcionar cada vez mais seus esforços para melhorar seus rendimentos e, principalmente, reduzir seus custos de produção o que, sem dúvida, se tornou um dos grandes desafios de muitas empresas, e melhorar seu aproveitamento energético, ou seja, produzir o que precisam consumindo menos energia para isso.

Neste contexto, o estudo de meios para se utilizar as energias disponíveis de modo mais racional e eficiente, garantindo assim a sustentabilidade industrial, mostra-se muito oportuno.

Diante deste cenário, este trabalho pretende identificar as falhas no sistema de reaproveitamento de vapor de uma empresa do pólo industrial de Manaus, mostrando as opções disponíveis para saná-las e indicando a mais vantajosa.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Demonstrar os resultados de eficiência energética em um sistema de reaproveitamento de vapor em comparação com um sistema tradicional.

### 2.2 Objetivos específicos

- a) Mostrar a atual situação operacional dos sistemas de retorno de condensado;
- b) Orientar medidas a serem tomadas para melhorar a produtividade do sistema e consequentemente reduzir perdas;
- c) Destacar oportunidades de ganhos energéticos potenciais com reaproveitamento do vapor;
- d) Quantificar e estratificar financeiramente os ganhos obtidos;
- e) Orientar os investimentos em pontos que realmente possuam retornos financeiros adequados.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Vapor

O vapor é uma das principais formas de energia usada na indústria, pois é seguro, de baixo custo, possibilita aquecimento rápido e uniforme com controle preciso de pressão e temperatura além de apresentar ótimas taxas de transferência térmica.

O fenômeno de passagem da água do estado líquido para o gasoso chama-se vaporização e seu resultado é o vapor.

A vaporização pode ser lenta ou enérgica. A lenta é aquela que se dá em temperatura ambiente, como nos oceanos, rios e lagos e é graças a ela que as chuvas acontecem, pois é o vapor formado pela vaporização lenta que forma as nuvens, que depois se condensam e caem na forma de chuva. Já a vaporização enérgica se dá quando se incide muito calor em determinada quantidade de água até que ela evapore. É usando esse tipo de vaporização nas caldeiras, que as indústrias conseguem o vapor de que necessitam para seus processos.

Por possuir vantagens como eficiência, facilidade de transporte, alta capacidade de armazenamento de calor e baixo custo quando comparado com outras formas de energia, o vapor se tornou, praticamente, um meio indispensável de transferência de energia.

Dependendo basicamente das condições de temperatura e pressão do ambiente onde a água se encontra, ela vai estar no estado sólido, líquido ou gasoso como mostra a figura 1 abaixo (BABCOCK E WILSON, 1985; SARCO, 2005; BOTELHO E BIFANO, 2011; VAN WYLAN, 1995):

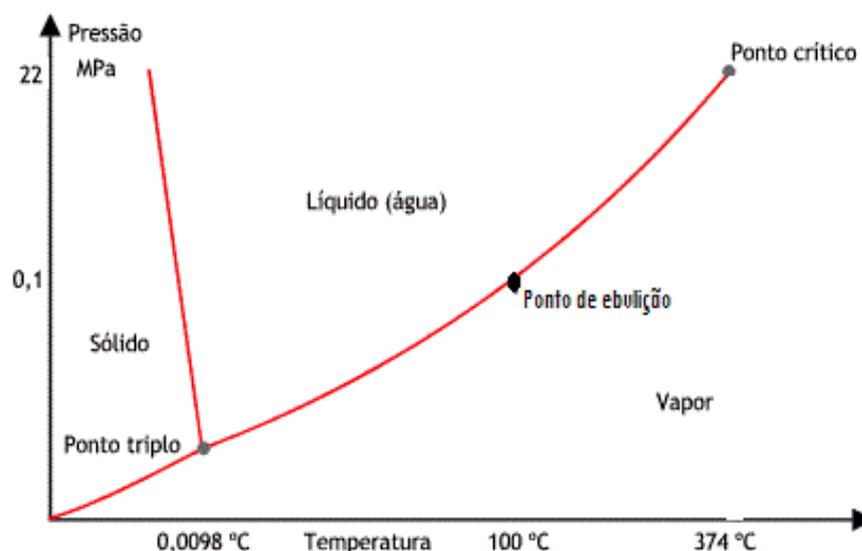


Figura 1: Diagrama de fases da água. Fonte: Van Wylan (1995).

### 3.2 Tipos de vapor

Dependendo da quantidade de água presente no vapor, ele pode ser classificado como saturado, seco, úmido ou superaquecido.

Vapor saturado é aquele que apresenta um pouco de água em forma de gotículas, as quais se originam dos esfriamentos que sempre e inevitavelmente acontecem. O vapor produzido pelas caldeiras comuns, sempre será saturado enquanto houver água em seu interior.

Vapor seco é o vapor saturado só que agora com pouca umidade a qual foi removida pelos purgadores.

Vapor úmido é o vapor saturado com muita água, portanto pobre e com pequena capacidade de transmitir calor. Esse tipo de vapor normalmente se origina por problemas de isolamento da linha de distribuição e também quando a caldeira é recolocada em trabalho depois de ter esfriado assim como a linha.

Vapor superaquecido é o vapor saturado que recebeu ainda mais aquecimento até que as gotículas de água presentes nele tenham se transformado integralmente em vapor. Esse tipo de vapor é produzido em supercaldeiras e geralmente é usado para girar eixos, acionar turbinas e quaisquer outros equipamentos cuja presença de água será prejudicial, pois devido as altas velocidades desses equipamentos, a presença de água, mesmo que em ínfima proporção, produziria forte abrasão nos mesmos.

Vapor flash é o vapor que se forma devido a uma brusca queda de pressão, que ocorre quando o condensado do sistema é descarregado, ou seja, ele é vapor reevaporado.

Vapor vivo é o nome que se dá ao vapor que efetivamente chega ao(s) ponto(s) de consumo e que realizará o trabalho para o qual o vapor foi produzido (BOTELHO E BIFANO, 2011; CHIARANTANO; SANTANA, 2008; FERNANDES; PIZZO; MORAES. JUNIOR, 2006).

### **3.3 Eficiência energética em sistemas de vapor**

A eficiência energética de um sistema de vapor pode ser entendida como sendo a relação entre a energia que foi usada para alimentar o sistema e a energia que foi efetivamente consumida pelo sistema ou, em outras palavras, é o quanto o sistema ou equipamento se aproxima de um desempenho ideal, ou seja, sem perdas.

A utilização eficaz da energia em instalações industriais é essencial para a diminuição dos custos de processo, preservação das fontes de energia não renováveis, redução do impacto ambiental e para o aumento da competitividade e sustentabilidade industrial tanto que, alguns países, com o objetivo de melhorar seus sistemas e diminuir suas perdas, investiram em projetos de eficiência energética que inclusive consideravam a aquisição de equipamentos com melhor rendimento.

Para se alcançar a meta da eficiência energética é preciso primeiramente conhecer o sistema, para depois avaliar parâmetros como calor transferido e trabalho realizado, no caso de um sistema de vapor, para aí sim, determinar os pontos de desperdício e onde é possível implantar melhorias (NOGUEIRA; ROCHA, 2002; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009; WANG, 2009; ELETROBRAS, 2007; BOYD, 2011).

### 3.4 Produção e utilização de vapor

Desde a revolução industrial a produção e utilização do vapor foram amplamente intensificadas, embora seu uso tenha começado bem antes disso com os gregos e romanos.

Para que uma determinada massa de água passe do estado líquido para o gasoso (vapor) é necessário uma quantidade suficiente de calor para que isso ocorra. Sob pressão atmosférica, essa mudança de estado acontece da seguinte forma: à medida que essa massa de água recebe calor, sua energia interna e conseqüentemente sua temperatura aumentam até atingir sua temperatura de saturação, que é aos 100 graus célsius. A partir desse momento, qualquer acréscimo de calor fará com que a água evapore e enquanto houver água o processo de mudança ocorrerá em temperatura constante. Se o vapor já produzido for aquecido ainda mais, o mesmo resultará em vapor superaquecido (INCROPERA et. al., 2008).

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).

O vapor saturado tem diversas aplicações, tais como (BOTELHO E BIFANO, 2011):

- Cozimento de alimentos;
- Aquecimento residencial, em lugares muito frios;
- Esterilização de alimentos e produtos;
- Vulcanização de pneus e outros artefatos de borracha;
- Recauchutagem da banda de rodagem de pneus velhos;
- Em lavanderias de grande porte, para gomar grandes quantidades de roupas.

Já o vapor superaquecido, além de já ter sido usado para movimentar as antigas locomotivas e navios a vapor, hoje é usado para (BOTELHO E BIFANO, 2011):

- Movimentar turbinas para geração de energia;
- Fornos especiais;
- Fundições;
- Solda de alguns materiais.

### 3.4.1 Tipos de caldeiras

As caldeiras podem ser entendidas como trocadores de calor que vaporizam determinadas substâncias líquidas, principalmente água, em alta pressão, se utilizando da energia térmica fornecida por uma fonte, que normalmente é um combustível, mas também pode ser a eletricidade.

A alta pressão usada na produção do vapor faz o mesmo fluir da caldeira para a linha de distribuição (COSTA; BRESTEL, 1989; RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010; SARTORELLI, 2009).

As caldeiras são equipamentos caros e que representam um risco em potencial, por isso devem ser operadas por mão de obra técnica especializada, na verdade, a NR-13 do ministério do trabalho rege o trabalho com as caldeiras desde seu projeto até sua manutenção (BRASIL, 1994).

Segundo Botelho e Bifano as caldeiras se classificam segundo a forma em horizontais, que são as mais comuns, e em verticais, que são menos comuns e menores.

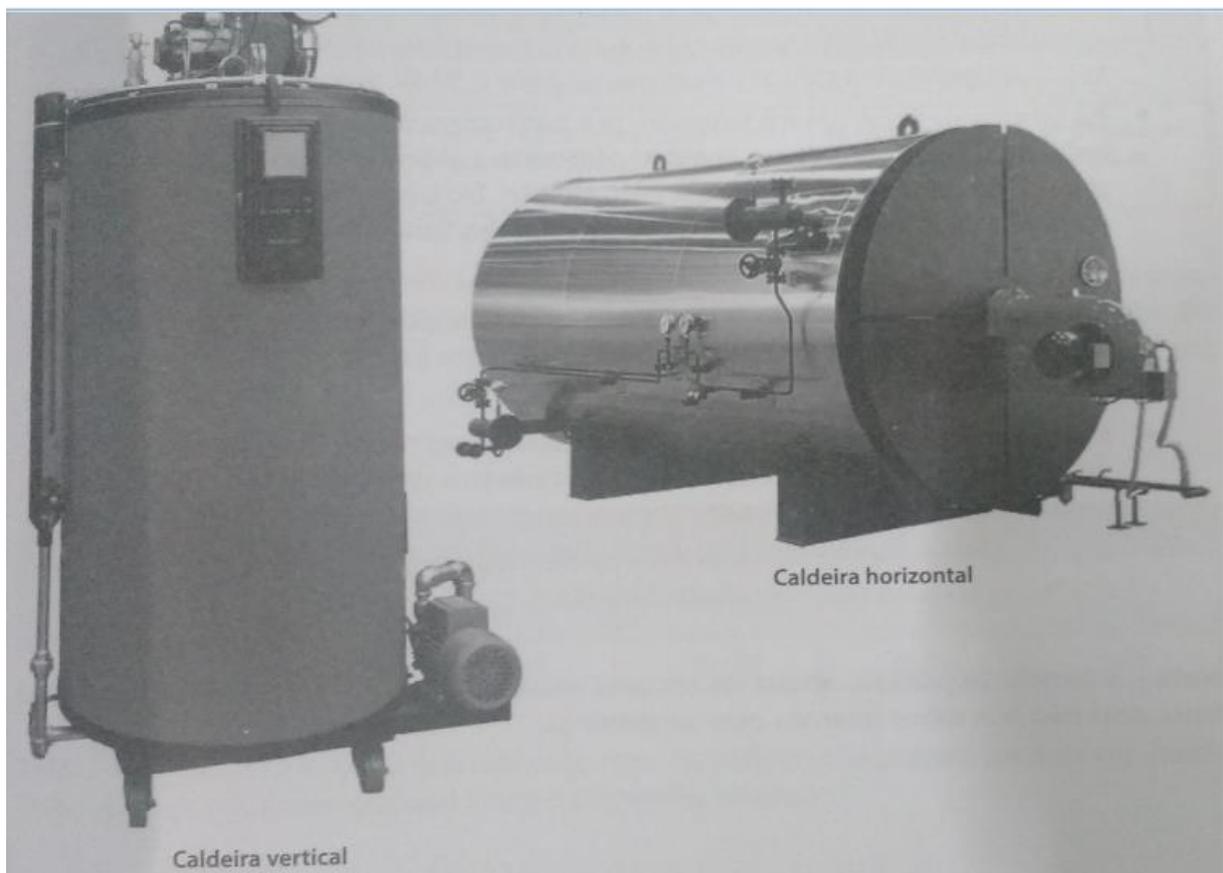


Figura 2: Caldeira horizontal e vertical. Fonte: Botelho e Bifano (2011).

Já quanto sua disposição interna e funcionamento, elas podem ser:

Aquatubulares: a água circula dentro de diversos tubos pequenos enquanto os gases envolvem os mesmos esquentando a água até sua vaporização. São empregadas quando se quer obter grandes pressões e elevadas quantidades de vapor (MARTINELLI JUNIOR, 1998; SPIRAX SARCO, 2000; TROVATI, 2012).

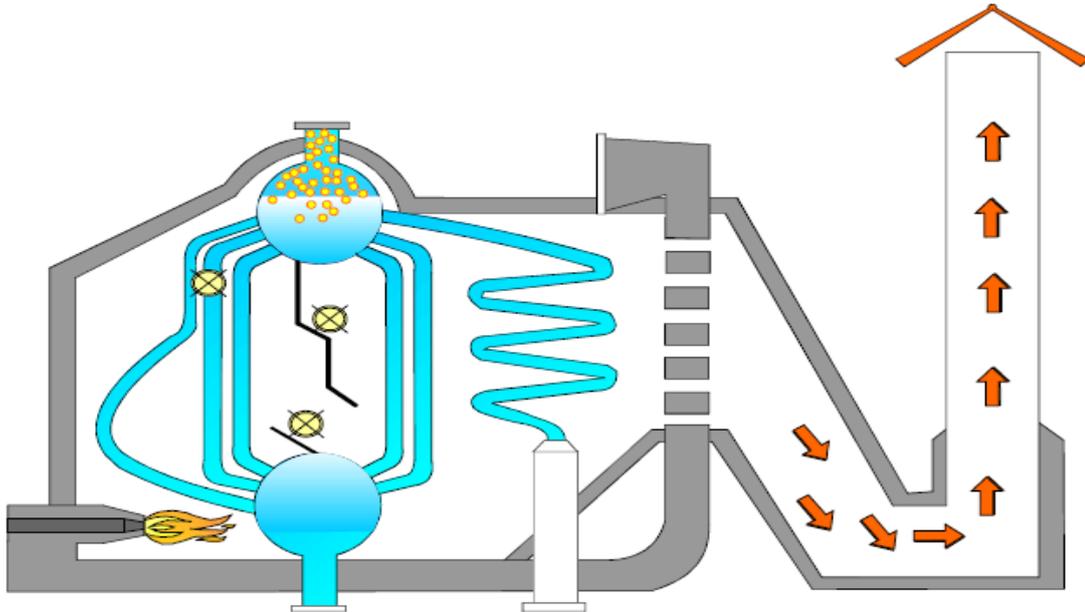


Figura 3: Caldeira aquatubular. Fonte: Spirax Sarco (2010).

Flamotubulares: são aquelas onde os gases quentes circulam dentro de tubos esquentando a água que os envolvem. São as mais comuns, porém não produzem vapor em pressões muito altas como as aquatubulares. Sua eficiência varia em torno de 80 a 90%, sendo difícil elevar esses valores por ser também difícil implementar sistemas de recuperação de calor (BOTELHO E BIFANO, 2011; BIZZO, 2012; NASCIMENTO JUNIOR; SARTORELLI, 2009).

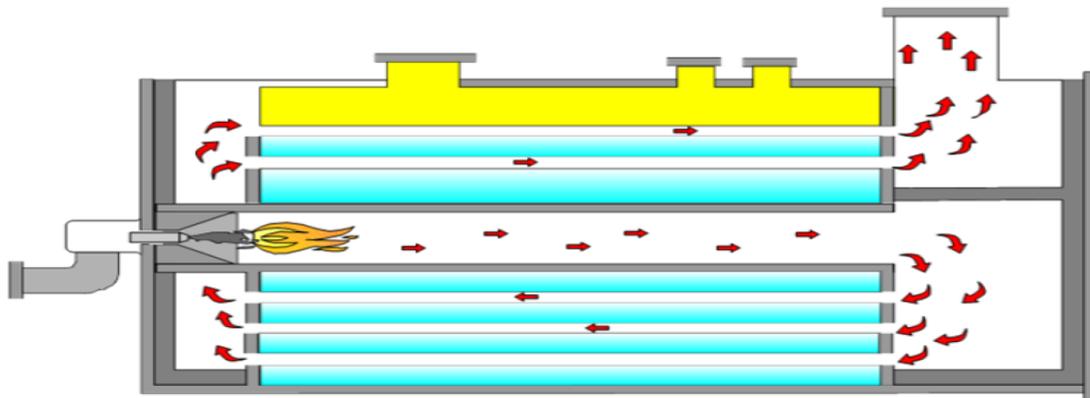


Figura 4: Caldeira flamotubular. Fonte: Spirax Sarco (2010).

Mistas: Por queimarem combustíveis sólidos, são a melhor opção quando se dispõe desse tipo de combustível a baixo custo, embora sua eficiência seja inferior as outras duas (BIZZO, 2012).

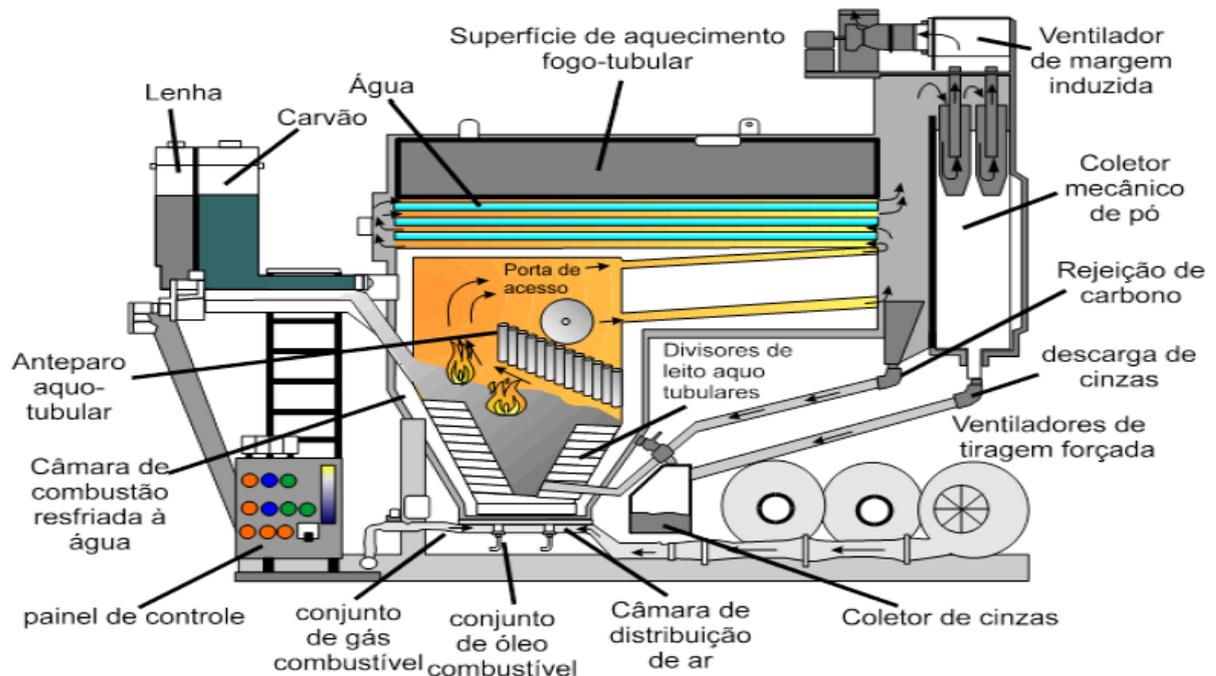


Figura 5: Caldeira mista. Fonte: Spirax Sarco (2005).

### 3.5 Controle da qualidade do vapor

Como já vimos, o vapor é produzido pelo aquecimento da água, portanto para se obter vapor de qualidade, e necessário obrigatoriamente, que a água que será utilizada para tal fim seja a melhor possível, pois se as impurezas dissolvidas na água da caldeira não forem controladas de forma adequada, isso poderá resultar em corrosão e formação de depósitos nos tubos e equipamentos (COSTA; BRESTEL, 1989).

Mesmo que a água disponível para ser usada na caldeira seja água potável de excelente qualidade, isso não significa que ela pode ser usada na caldeira, pois a mesma apresenta muitos sólidos e gases dissolvidos, principalmente o oxigênio, que atacam os metais da caldeira e provocam incrustações (BOTELHO E BIFANO, 2011).

Há o tratamento da água que ainda vai entrar na caldeira, por meio de abrandadores e desmineralizadores, e o da água que já esta dentro da caldeira, ambos com a finalidade de transformar os sólidos dissolvidos em suspensão para formar o lodo que e facilmente retirável por descargas de fundo, e remover o oxigênio que está dissolvido na água (BOTELHO E BIFANO, 2011).

Outro fator também importante e independente dos da quantidade de sólidos dissolvidos na água é o PH da mesma, que deve ser mantido sempre alcalino, mas não em

excesso para não atacar o mostrador de vidro do nível de água. Se ficar ácido vai atacar os metais da caldeira (BOTELHO E BIFANO, 2011).

Para controlar os sólidos totais dissolvidos (TDS), existe o sistema de purga contínua, que pode ser manual ou automático. O TDS é parâmetro de regulação da água da caldeira, pois se o mesmo estiver muito alto, uma quantidade de água da caldeira será liberada para ser substituída por outra com TDS mais baixo.

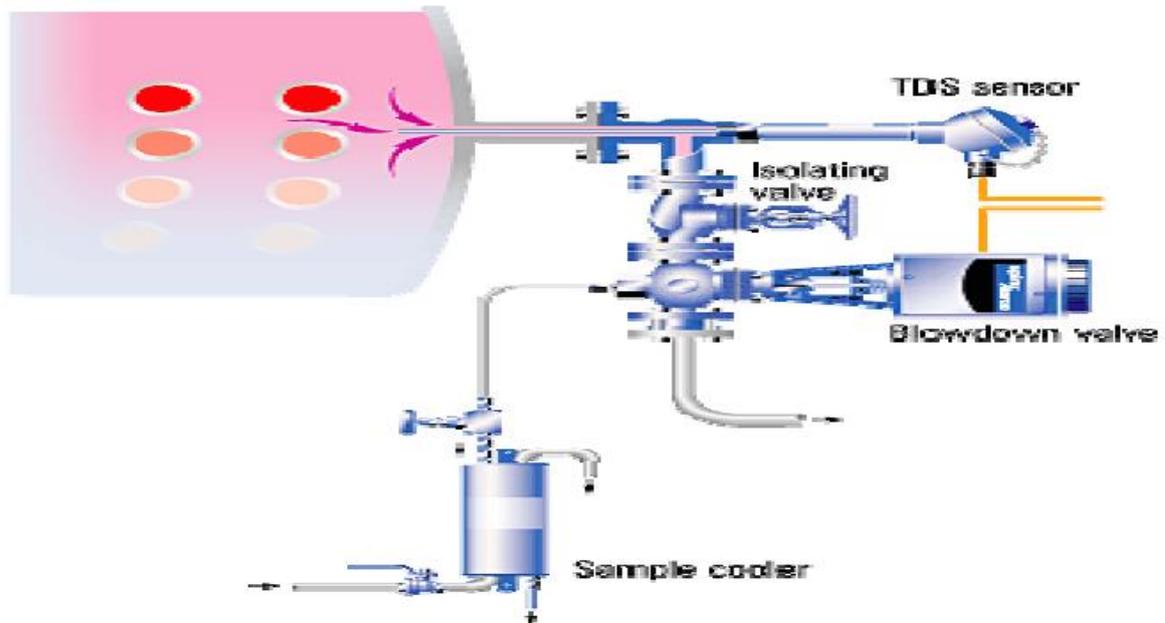


Figura 6: Sistema automático de TDS. Fonte: Spirax Sarco (2010).

Um sistema de tratamento de água ineficaz ou inexistente, pode causar graves problemas para a caldeira, tubulações e equipamentos que usam o vapor, tais como (BOUREE, 1982):

- Incrustações e formação de depósitos
- Corrosão
- Arraste de impurezas pelo vapor

Para eliminar esses riscos, além do controle de TDS, as caldeiras também possuem válvulas de descarga de fundo, manuais ou automáticas, que têm a função de purgar a lama ou sedimentos do fundo da caldeira.

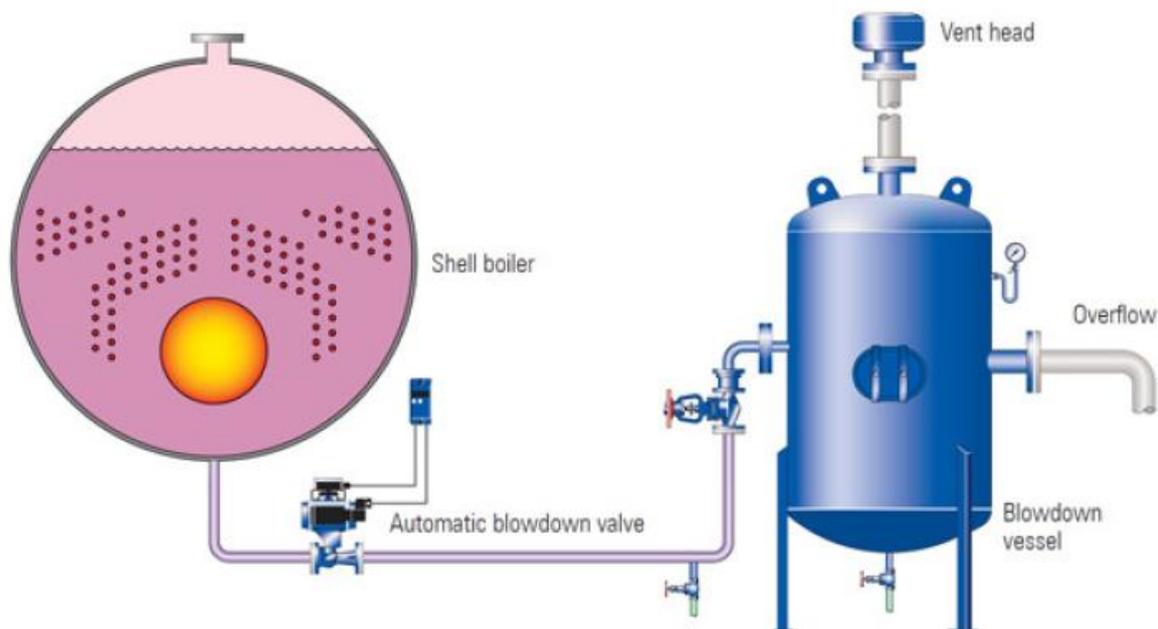


Figura 7: Descarga de fundo automática. Fonte: Spirax Sarco (2010).

Dependendo do tipo do tratamento da água e do rigor com que o controle é feito, os sais dissolvidos produzirão mais ou menos depósitos nas paredes dos tubos, os quais funcionam como uma barreira isolante, aumentando a temperatura dos tubos acima do limite suportável, podendo causar rupturas e paradas de emergência, por isso deve ser mantida uma retirada contínua ou intermitente de água pela purga, a qual, caso não haja reuso ou reciclo dessa água, não deixa de representar uma perda de energia, pois a água expelida está quente, e também de produtos químicos que estavam na mesma. No caso da purga ser insuficiente, serão formados depósitos e incrustações que acarretarão menos transferência de calor e mais corrosão e superaquecimento (NAVISTSKY; GRABOWSKY, 1998; SANTOS, 1991).

Em suma, para garantir a qualidade do vapor, ele deve ser produzido (ELETROBRAS, 2005):

- 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.

### **3.6 Sistema de distribuição de vapor**

O sistema, linha ou rede de distribuição serve para levar o vapor produzido na caldeira até os pontos de consumo e deve enviá-lo na pressão e temperatura corretas, quantidade certa, sem ar e seco. Para que isto aconteça o dimensionamento, drenagem de condensado e o isolamento térmico dos tubos, válvulas e acessórios precisam está corretos (BOTELHO E BIFANO, 2011; RODRIGUES, 2012; PALACIOS, 2010).

A ligação entre os pontos de produção e utilização do vapor é feita por meio de tubos, os quais devem ser de material adequado e ter seus diâmetros corretamente dimensionados para se conseguir perdas mínimas, ao passo que, se estiver subdimensionado, ocasionará uma grande perda de carga e até falta de vapor nos pontos de consumo (SCANAVINO, 2014).

Segundo Telles (1970), as tubulações recomendadas para trabalhar com vapor, normalmente devem ser de aço sem costura ligadas por solda de topo ou de encaixe.

A figura 8 mostra os materiais usados para tubulações a vapor:

| Temperatura máxima do vapor (°C)           | TUBOS                  |                                                                   |                   |                      |
|--------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|
|                                            | Diâmetro nominal (pol) | Material Especificações ASTM/API                                  | Tipos de ligações | Margem para corrosão |
| 120 (incluindo vapor exausto e condensado) | Todos                  | Aço-carbono A120 ou A53                                           | Solda             | 1,2                  |
|                                            | Até 4"                 | Aço-carbono galvanizado                                           | Solda             | -                    |
| 200                                        | Todos                  | Aço-carbono A53 ou API5L                                          | Solda             | 1,2                  |
|                                            | Até 2"                 | Latão, cobre, alumínio                                            | Rosca ou Solda    | 1,2                  |
| 380                                        | Todos                  | Aço-carbono A53 ou API5L ou A672 Gr-A55                           | Solda             | 1,2                  |
| 420                                        | Todos                  | Aço-carbono acalmado (Si) - A106 ou A672 Gr B60, 70 ou Gr C60, 70 | Solda             | 1,2                  |
| 450                                        | Todos                  | Aço-liga 1/2 Mo A335 Gr P1 ou A672 Gr CM65, 70                    | Solda             | 1,2                  |
| 470                                        | Todos                  | Aço-liga de 1 1/4 Cr-1/2 Mo A335 Gr-P1 ou A691 Gr-1 1/4 Cr        | Solda             | 1,2                  |
| 480                                        | Todos                  |                                                                   |                   |                      |
| 550                                        | Todos                  | Aço inoxidável tipo 304                                           | Solda             | -                    |

Figura 8: Materiais recomendados para tubulações de vapor. Fonte: Telles (2001).

### 3.7 Perdas térmicas

Como em qualquer sistema não ideal, nos sistemas de vapor sempre ocorrerão perdas devido a diversos fatores inerentes ao processo, o que significa que parte do vapor produzido pela caldeira não chegará aos pontos de consumo, assim como uma fração do condensado gerado não voltará a caldeira, o que acarreta sempre um ressuprimento de água no ciclo de geração (HARREL, 2002; WANG, 2008; BARRIGA, 2012).

Devido a fatores como temperatura, pressão, corrosão e erosão causadas pelo próprio vapor, é comum encontrar fugas de vapor nas instalações, as quais ocorrem principalmente nas válvulas, juntas e flanges e se não forem sanadas podem se tornar a principal fonte de desperdício energético da planta (ASSOCIACAO EMPRESARIAL DE PORTUGAL, 2010).

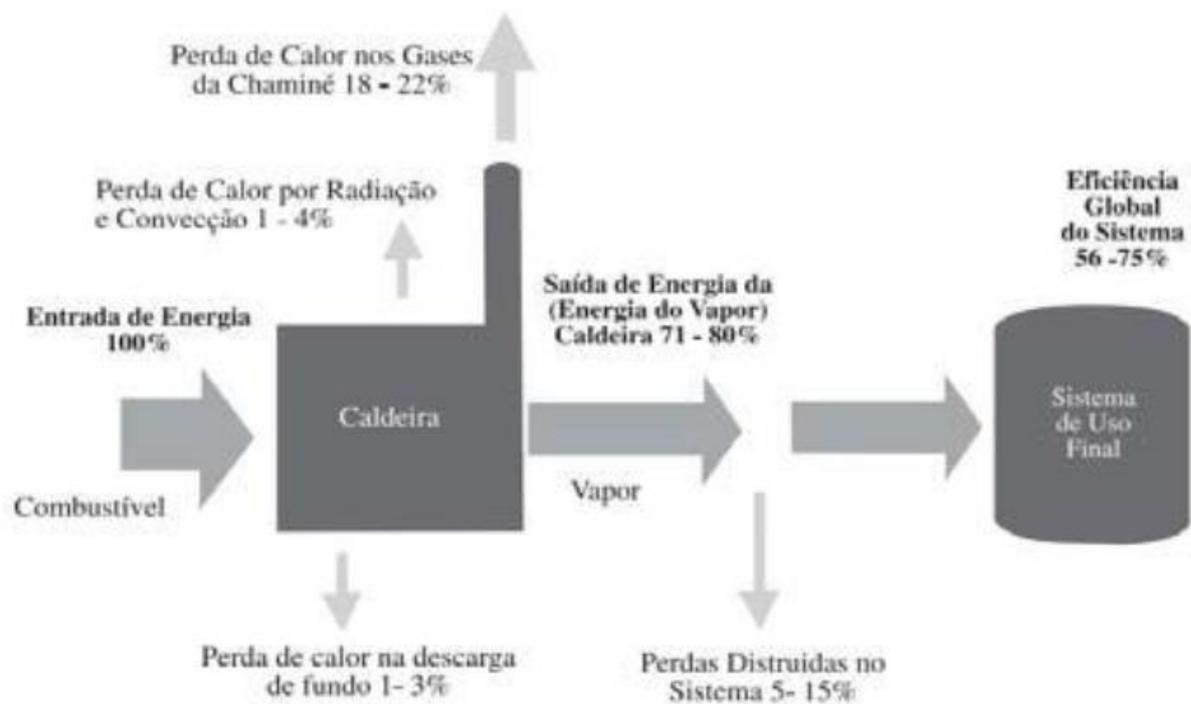


Figura 9: Balanço de energia em um sistema de vapor. Fonte: Eletrobrás (2005).

| <b>Geração de Vapor</b>      |                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Área de melhoria</b>      | <b>Medidas para reduzir perdas</b>                                                                                                                    |
| Eficiência da caldeira       | -Medições frequentes dos gases;<br>-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;<br>-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;<br>-Manter temperatura constante.                                |
| Descargas                    | -Evitar descargas excessivas.                                                                                                                         |
| <b>Distribuição de Vapor</b> |                                                                                                                                                       |
| Condensado                   | -Drenagem eficiente nos pontos de acúmulo;<br>-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;<br>-Aplicação de elementos termostáticos para eliminação.                      |
| Vazamentos                   | -Verificação frequente e reparo.                                                                                                                      |
| <b>Área de melhoria</b>      | <b>Medidas para reduzir perdas</b>                                                                                                                    |
| <b>Utilização de Vapor</b>   |                                                                                                                                                       |
| 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.                                                                                                          |
| <b>Retorno do Condensado</b> |                                                                                                                                                       |
| Vapor flash                  | -Verificação do aproveitamento;<br>-Considerar sua formação no dimensionamento da tubulação.                                                          |
| Retorno do condensado        | -Verificação dos pontos onde o condensado não é recolhido;<br>-Possibilidade de retorno por gravidade;<br>-Verificação da viabilidade do bombeamento. |
| Isolamento térmico           | -Isolamento do tanque de condensado;<br>-Isolamento da tubulação.                                                                                     |

Figura 10: Oportunidades de conservação de energia em um sistema de vapor. Fonte: Eletrobrás (2005).

### 3.7.1 *Perdas de calor para o ambiente*

As perdas térmicas vão ocorrer desde a partida da caldeira, em virtude das tubulações estarem frias e precisarem ser aquecidas até atingir a mesma temperatura do vapor e entrar em regime normal de operação, e também vão ocorrer em trabalho, devido a condução, convecção e radiação que podem produzir perdas significativas a ponto de comprometer o desempenho dos equipamentos que consomem vapor.

Uma tubulação, com ou sem isolamento térmico perderá calor por convecção e radiação, sendo as perdas por esta última bem mais significativas que por convecção (SOARES, 1982; LUDWIG, 1999).

### 3.7.2 *Perdas por vazamento*

Em linhas de vapor os vazamentos muito dificilmente não ocorrerão, ou seja, eles são até comuns, principalmente em flanges, uniões e válvulas. Normalmente ocorrerão por pequenos orifícios o que, a princípio, representa uma perda também pequena, no entanto se ocorrerem em grande escala podem representar perdas significativas (HOOPER; GILLETE, 1994).

### 3.7.3 *Perdas na caldeira*

Normalmente o principal desperdício de energia a nível de caldeira, acontece pelo não aproveitamento do calor presente nos gases expelidos pela chaminé. Esse fato pode ser verificado pela temperatura desses gases, isto é, quanto mais alta a temperatura deles, mais ineficiente está sendo a operação da caldeira (SPIRAX SARCO, 2011).

A operação da caldeira só vai ser realmente eficiente quando houver a troca térmica dos gases de combustão com o vapor, pois uma redução de 22 graus nesses gases acarreta um aumento de 1 grau na eficiência da caldeira sendo que, baixa produção de vapor e sujeiras nas áreas de transferência de calor podem influenciar negativamente esse desempenho.

#### 3.7.4 *Perdas pelas tubulações*

Sem dúvida uma das fontes de desperdício de calor em uma linha de vapor são tubos sem ou inadequadamente isolados, pois isso faz com que boa parte do calor seja irradiado para o ambiente, acarretando uma redução de pressão no ponto de consumo final e o aumento de carga na caldeira para compensar tais perdas. Para que isso não ocorra, todo o isolamento e a tubulação do sistema de distribuição devem ser regularmente inspecionados e substituídos quando necessário (MANUAL DE BOAS PRATICAS PARA EFICIENCIA ENERGETICA, 2010).

#### 3.7.5 *Perdas nos purgadores*

Os purgadores são elementos cruciais em sistemas de vapor, mas também são uma das principais causas de perdas de energia, pois quando apresentam problemas, os mesmos são difíceis de serem detectados (MANUAL DE BOAS PRATICAS PARA EFICIENCIA ENERGETICA, 2010).

Geralmente essas perdas acontecem quando (MANUAL DE BOAS PRATICAS PARA EFICIENCIA ENERGETICA, 2010):

- O purgador falha na posição de abertura e permite a fuga de vapor;
- O tamanho ou tipo do purgador instalado não é o adequado;
- Purgador instalado no lugar errado;
- O método utilizado para instalar o purgador não foi o correto.

Com o intuito de eliminar ou pelo menos diminuir ao máximo as perdas nesses dispositivos, um procedimento eficiente de manutenção para eles deve ser criado e executado (MANUAL DE BOAS PRATICAS PARA EFICIENCIA ENERGETICA, 2010).

#### 3.7.6 *Perda de carga*

Quando um fluido percorrer o interior de uma tubulação haverá atrito entre ele e as paredes do tubo assim como uma turbulência produzida pelo próprio fluido. Devido a esses fatores, a pressão dentro dessa tubulação vai diminuindo pouco a pouco a medida que o fluido percorre seu interior. Essa queda de pressão é chamada de perda de carga, que pode ser calculada pela fórmula de Darcy-Weissbach abaixo, embora existam outras (GERNER, 2014):

$$\Delta P = f \cdot (L/D_i) \cdot [(p \cdot v^2)/2]$$

Onde:  $\Delta P$  = Perda de carga

$f$  = Fator de atrito equivalente

$L$  = Comprimento da seção da tubulação

$D_i$  = Diâmetro interno do tubo

$p$  = Densidade em  $\text{kg/m}^3$  (Tabelado)

$v$  = Velocidade em  $\text{m/s}$

O valor de  $f$ , conhecido como fator de atrito equivalente, pode ser determinado através de equações matemáticas, em função do Número de Reynolds ( $Re$ ) e da viscosidade do fluido.

### 3.8 Purgadores

Os purgadores são dispositivos mecânicos automáticos que têm a função de separar e eliminar o ar, gases incondensáveis e principalmente o condensado formado nas linhas de vapor sem deixar escapar o vapor vivo. Esse processo é chamado de purga e, para ser eficiente, deve acontecer assim que o condensado se forma para que não ocorra queda de temperatura nem perda de transferência de calor.

A produtividade de uma fábrica pode sofrer significativas quedas por causa da presença de ar e outros gases incondensáveis em seu sistema de vapor e, como nem sempre os purgadores conseguirão eliminá-los por completo devido ao porte dos equipamentos e da linha, pode ser necessário instalar eliminadores de bolsões de ar, os quais podem ficar na parte superior dos equipamentos e/ou nos finais de linha.

Caso os purgadores não estejam funcionando corretamente, seja por problemas mecânicos ou por instalação incorreta, isso causará escape de vapor, perdas de energia, elevação dos custos e até a paralisação da produção (TELLES, 1970; PALACIOS 2010; TELLES, 1999; SPIRAX SARCO, 2011).

| 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 <sub>2</sub> existente no vapor, formando o ácido carbônico.                                                                                                                                                   |

Figura 11: Efeitos da drenagem ineficiente ou incorreta. Fonte: Spirax Sarco (2005).

### 3.8.1 Instalação dos purgadores

Para que tenham alto desempenho, os purgadores devem ser colocados em uma derivação da tubulação a qual deve sair do fundo do acumulador de condensado que fica na parte inferior da linha.

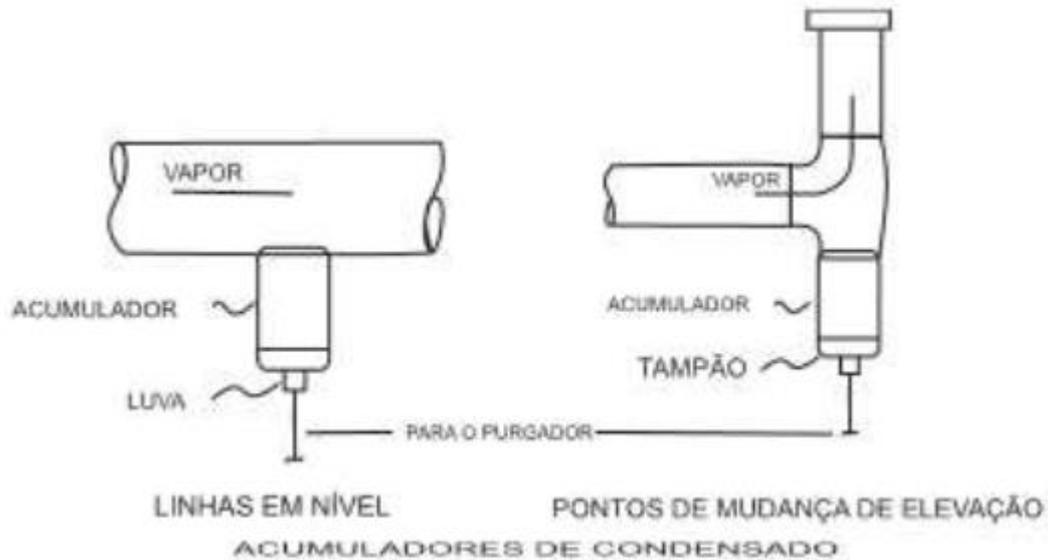


Figura 12: Purgador para drenagem de linhas de vapor. Fonte: Nogueira (2005).

Em todas as tubulações deve ser instalado um purgador e sua tubulação de entrada tem que ser totalmente ligada ao fundo do acumulador e o condensado deve chegar ao interior deste por gravidade (TELLES, 1970).

Para facilitar a retirada do condensado, os purgadores devem ser instalados nos seguintes pontos da linha conforme figura 13 e devem (NOGUEIRA, 2005; BOTELHO E BIFANO, 2011):

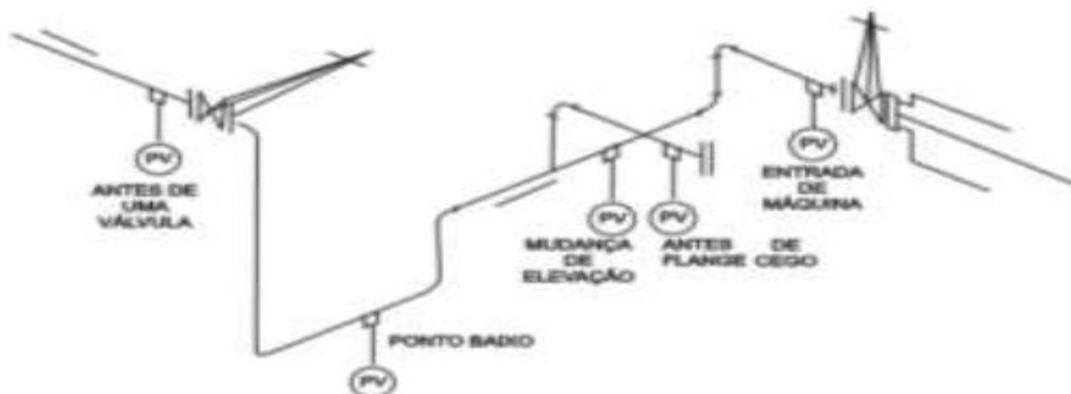


Figura 13: Pontos de instalação dos purgadores para drenagem de condensado. Fonte: Nogueira (2005).

- Ter inclinação no sentido do seu sentido;
- Deve ter purgadores a cada 40-50m;

- Nos pontos extremos (no sentido do fluxo de vapor) fechados com tampões e flanges cegos;
- Nos pontos baixos e em todos os pontos com aumento de elevação (colocados na elevação mais baixa);
- Nos trechos em que a tubulação está no mesmo nível, a cada 100m a 250m deve haver um purgador (quanto mais baixa for a pressão do vapor, mais purgadores devem ter).

### 3.8.2 Tipos de purgadores

A diferença principal entre os tipos existentes está no acionamento e eles estão agrupados em três categorias: mecânicos, termostáticos e termodinâmicos.

Os mecânicos funcionam utilizando a diferença de densidade entre vapor e condensado, pois por causa dessa diferença, um componente se desloca num certo sentido, agindo sobre um orifício de descarga. Os principais representantes desse tipo de purgador são os de boia livre, os de boia e alavanca, os de panela ou balde aberto e os de panela ou balde invertido (TBP, 1975; U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000; PALACIOS, 2010).

Os purgadores de boia são os mais usados para reter vapor na saída de equipamentos, no entanto não é capaz de expelir o ar e outros gases que por ventura também estejam na tubulação. Eles se resumem a uma entrada de vapor e uma saída de condensado, a qual se abre quando há condensado dentro do purgador, o qual faz a boia flutuar e liberar o condensado.

O purgador de panela invertida recebe esse nome porque tem uma panela com fundo para cima em seu interior, a qual abre a válvula de saída de condensado toda vez que o purgador se enche de água a ponto de fazer a panela se acomodar no fundo do dispositivo (TELLES, 2001).

Já os purgadores termostáticos tem seu funcionamento baseado na diferença de temperatura entre o vapor e o condensado, ou seja, para ser eliminado, a temperatura do condensado deve ser menor que a de saturação, o que significa que o condensado ficará retido no purgador até perder todo seu calor sensível.

Quando se quer eliminar uma grande quantidade de ar de um sistema de vapor que trabalha a baixa e média pressão, normalmente se usa um purgador termostático de fole, que consiste num recipiente dentro do qual há um pequeno fole que pilota a válvula de saída de condensado. O fole contém um líquido de ponto de ebulição menor que o da água para poder funcionar, pois quando o vapor entra em contato com o fole, ele vaporiza o líquido dentro do mesmo e fecha a saída de vapor, ao passo que o ar e o condensado contraem o fole e abrem a saída (SPIRAX SARCO, 2004; TELLES, 2001; TELLES 1999).

Os purgadores termodinâmicos funcionam pela diferença de pressão e temperatura existente entre vapor e condensado. São formados por uma caixa dentro da qual há um disco móvel que abre a válvula de saída toda vez que o vapor faz pressão suficiente sobre o condensado para que isso ocorra, no entanto quando isso acontece, a alta velocidade do vapor que escapou para baixo do disco junto com o condensado, forma uma zona de baixa pressão, o que faz com que o disco seja empurrado novamente para baixo até que a saída seja totalmente bloqueada (PALACIOS, 2010; TELLES, 2001).

Os purgadores tipo labirinto e tipo impulso não se enquadram em nenhuma das três categorias anteriores, formando um caso a parte (PALACIOS, 2010; TELLES, 2001).

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

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

Figura 14: Principais tipos de purgadores e suas características de operação. Fonte: Spirax Sarco (2005); IBP (1975); Telles (1999); U.S. Department of Energy (2000); Palácios (2010).

### 3.8.3 Escolha dos purgadores

Tendo em vista que não há um purgador universal, para se escolher o mais adequado para ser usado em determinada linha de vapor, é necessário conhecer os diferentes tipos existentes, suas vantagens, desvantagens e ganhos financeiros que cada um proporcionará se for usado. Em suma, para escolher corretamente os seguintes fatores devem ser considerados (SPIRAX SARCO, 2004; TELLES, 2001):

- 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;

- Finalidade do purgados;
- Pressão e temperatura do vapor na entrada do purgador;
- Descarga do condensado para uma linha de retorno ou atmosfera;
- Quantidade de condensado a ser eliminada;
- Perda de vapor vivo;
- Quantidade de ar ou gases presentes no vapor;
- Ação de corrosão e/ou erosão do vapor ou do condensado na tubulação;
- Facilidade de manutenção.

As figuras 15 e 16 abaixo apresentam as características e emprego dos purgadores de vapor.

| Tipo                | Pressão máxima do vapor (kg/cm <sup>2</sup> ) | Capacidade máxima (kg/h) | Permite descarga contínua? | Eliminação do ar | Resistência a golpes de ariete | Perda de vapor | Necessidade de manutenção |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------|
| Bóia                | 35                                            | 50.000                   | sim                        | pode ser         | não                            | pouca          | regular                   |
| Panela invertida    | 180                                           | 15.000                   | não                        | sim              | sim                            | pouca          | bastante                  |
| Panela aberta       | 100                                           | 6.000                    | não                        | sim              | sim                            | pouca          | bastante                  |
| Expansão metálica   | 50                                            | 4.000                    | pode ser                   | sim              | sim                            | bastante       | regular                   |
| Expansão líquida    | 35                                            | 4.000                    | pode ser                   | sim              | não                            | bastante       | regular                   |
| Expansão balanceada | 35                                            | 1.000                    | pode ser                   | sim              | não                            | bastante       | regular                   |
| Termodinâmico       | 100                                           | 3.000                    | não                        | sim              | sim                            | regular        | quase nenhuma             |
| Impulso             | 100                                           | 5.000                    | não                        | não              | sim                            | regular        | quase nenhuma             |

Figura 15: Características dos purgadores. Fonte: Telles (2001).

| Serviços                                                    | Condições                               |                                                              | Tipos recomendados | Coefficiente de segurança (*) |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Drenagem de tubulações de vapor (com retorno de condensado) | Vapor saturado                          | Alta pressão: mais de 2 MPa ( $\approx 20 \text{ kg/cm}^2$ ) | B                  | 2                             |
|                                                             |                                         | Média pressão: até 2 MPa                                     | B -- C             | 2                             |
|                                                             |                                         | Baixa pressão: até 0,2 MPa ( $\approx 2 \text{ kgf/cm}^2$ )  | C -- B             | 3                             |
|                                                             | Vapor superaquecido                     | Alta pressão: mais de 2 MPa                                  | B -- C             | 2                             |
|                                                             |                                         | Média pressão: até 2 MPa                                     | C -- B             | 2                             |
|                                                             |                                         | Baixa pressão: até 0,2 MPa                                   | C -- B             | 3                             |
| Drenagem de tubulações de vapor (sem retorno de condensado) | Vapor saturado ou superaquecido         | Pressão até 0,1 MPa ( $\approx 1 \text{ kg/cm}^2$ )          | C                  | 2                             |
|                                                             |                                         | Pressão acima de 0,1 MPa                                     | D                  | 3                             |
| Aquecimento de tubulações                                   | -                                       | -                                                            | D                  | 3                             |
| Aparelhos de aquecimento de vapor                           | Altas vazões (mais de 4.000 kg/h)       | Vazão constante                                              | A -- B             | 2                             |
|                                                             |                                         | Vazão variável                                               | A -- B             | 4                             |
|                                                             | Médias e baixas vazões (até 4.000 kg/h) | Vazão constante                                              | A -- C             | 2                             |
|                                                             |                                         | Vazão variável                                               | C -- A             | 4                             |
| Serpentinas de tanques                                      | -                                       | -                                                            | B -- A             | 3                             |

Figura 16: Emprego dos purgadores. Fonte: Telles (2001).

A: purgador de bóia

C: purgador termostático ou de expansão metálica

B: purgador de panela invertida

D: purgador termodinâmico

(\*) coeficiente de segurança para para a quantidade de condensado calculada.

### 3.8.4 Manutenção e avaliação dos purgadores

Estima-se que de 15 a 30% dos purgadores de uma linha de vapor que está a mais de três anos sem receber manutenção adequada e regular, estejam com algum tipo de problema que resulte na perda de vapor vivo, o que, dependendo da quantidade de purgadores, poderá representar grandes perdas energéticas. Só para se ter uma ideia, um purgador com 3mm de diâmetro aberto direto pode liberar 30kg/h de vapor trabalhando a 7 barg. Para reduzir ao máximo a chance disso acontecer, um plano de manutenção que contemple não só os purgadores, mas também seus filtros que podem esta obstruídos, deve ser elaborado e executado num prazo razoável que irá depender do processo, embora o prazo de 6 em 6 meses seja considerado razoável (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

Os purgadores podem ser avaliados visual, acústica, eletrônica ou termicamente.

A inspeção visual pode ser usada em sistemas onde há recuperação de condensado e se resume em observar se a descarga dos purgadores para a atmosfera está sendo de vapor vivo ao invés de flash.

Já a inspeção acústica é ideal para sistemas com descargas intermitentes, pois nesta situação o som produzido pelo funcionamento normal e anormal do purgador são bem diferentes. Para esse método ser eficiente em descargas contínuas, é necessário que o operador do aparelho ultrassônico tenha uma boa experiência para que não haja erros de interpretação.

A inspeção eletrônica utiliza sensores para detectar e monitorar o condensado presente em uma câmara instalada antes dos purgadores, pois quando houver vazamento de vapor, ocorrerá um desequilíbrio nas pressões da câmara, fazendo o sensor detectar a fuga de vapor.

A inspeção menos confiável para avaliar purgadores é a térmica, uma vez que a temperatura do vapor e do condensado são próximas, o que dificulta o diagnóstico (SPIRAX SARCO, 2004; PALACIOS, 2010).

### **3.9 Isolação térmica**

Existem isolantes para sistemas quentes assim como para sistemas frios, no entanto ambos têm a mesma finalidade, que é diminuir ao máximo as trocas térmicas com o ambiente externo, reduzir as perdas no sistema, manter o fluido na temperatura desejada até que ele chegue ao seu destino e evitar queimaduras e desconforto térmico (TELLES, 2010).

A espessura dos isolantes térmicos deveria ser obtida por meio de cálculos, mas como na prática isso não se justifica, a escolha do isolante e de sua espessura, ou se baseia na comparação entre o custo da energia equivalente as trocas térmicas ao longo da tubulação ou numa espessura que faça com que o calor perdido seja compensado pelo calor do fluido em movimento a fim de manter uma determinada temperatura. Na prática, geralmente usa-se espessuras fornecidas em tabelas (NOGUEIRA, 2005; TELLES, 1970; TELLES, 2001).

Como exemplo a figura 17 demonstra a espessura da lã de rocha em função do diâmetro e espessura da tubulação:

| Espessura do isolamento térmico da tubulação (mm) - Lã de rocha |                                           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Diâmetro nominal (pol)                                          | Temperatura de operação da tubulação (°C) |           |           |           |           |           |           |           |
|                                                                 | Até 99                                    | 100 a 149 | 150 a 199 | 200 a 249 | 250 a 299 | 300 a 349 | 350 a 399 | 400 a 449 |
| 1/2                                                             | 25                                        | 25        | 25        | 40        | 50        | 65        | -         | -         |
| 3/4                                                             | 25                                        | 25        | 25        | 40        | 50        | 65        | -         | -         |
| 1                                                               | 25                                        | 25        | 25        | 40        | 50        | 65        | -         | -         |
| 1.1/4                                                           | 25                                        | 25        | 25        | 40        | 50        | 65        | -         | -         |
| 1.1/2                                                           | 25                                        | 25        | 25        | 40        | 50        | 75        | -         | -         |
| 2                                                               | 25                                        | 25        | 40        | 50        | 50        | 75        | -         | -         |
| 2.1/2                                                           | 25                                        | 25        | 40        | 50        | 50        | 75        | -         | -         |
| 3                                                               | 25                                        | 25        | 40        | 50        | 50        | 75        | -         | -         |
| 4                                                               | 25                                        | 40        | 50        | 50        | 65        | 75        | -         | -         |
| 5                                                               | 40                                        | 40        | 65        | 65        | 65        | 75        | -         | -         |
| 6                                                               | 40                                        | 40        | 75        | 65        | 75        | 75        | -         | -         |
| 8                                                               | 40                                        | 40        | 75        | 75        | 75        | 75        | -         | -         |

Figura 17: Espessura recomendada para o isolante lã de rocha. Fonte: Zatonni (2008).

Existem diversos materiais isolantes. Normalmente a escolha do mais apropriado e baseada na análise de tabelas como a da figura 18:

Materiais usados para isolamento térmico externo.

| Material                                               | Limites de temp. °C | Resistencia à |             |                                  | Condutividade térmica média BTU.pol/h.pe°.°F |         |         |         |         | Observações |
|--------------------------------------------------------|---------------------|---------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------------|
|                                                        |                     | Água/umidade  | Fogo        | Danos mecânicos                  | A 40°C                                       | A 100°C | A 200°C | A 300°C | A 400°C |             |
| Isolantes térmicos rígidos                             |                     |               |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |
| Materiais em forma de calhas ou segmentos pré-moldados |                     |               |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |
| Hidrossilicato de Ca                                   | Até 1000            | Boa           | Boa         | Boa à compressão, fraca à tração | 0,38                                         | 0,40    | 0,47    | 0,57    | -       | 1, 2        |
| Composição de Mg 85%                                   | Até 320             | Fraca         | Boa         | Boa à compressão, fraca à tração | 0,40                                         | 0,43    | 0,51    | 0,59    | -       | 3, 4        |
| Lã mineral (lã de rocha) - sílica em fios              | Até 900             | Boa           | Excelente   | Fraca                            | 0,32                                         | 0,37    | 0,50    | 0,64    | 0,77    | 5, 6, 7     |
| Sílica diatomácea (terra diatomácea)                   | Até 1000            | Fraca         | Regular     | Fraca                            | 0,58                                         | 0,60    | 0,68    | 0,78    | 0,86    | 7, 8        |
| Lã de vidro                                            | 180 a 540           | Excelente     | Excelente   | Fraca                            | 0,25                                         | 0,28    | 0,30    | -       | -       | 9, 11       |
| Espuma de plástico (poliestireno)                      | 50 a 80             | Excelente     | Não resiste | Regular                          | 0,40                                         | -       | -       | -       | -       | 10, 11      |
| Cortiça natural                                        | 50 a 80             | Boa           | Excelente   | Regular                          | 0,25                                         | 0,26    | -       | -       | -       | 11, 12, 13  |
| Isolantes térmicos flexíveis                           |                     |               |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |
| Materiais em forma de mantas (tecidos)                 |                     |               |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |
| Amianto                                                | Até 400             | Boa           | Excelente   | Regular                          | 0,47                                         | 0,50    | 0,57    | 0,65    | -       | 14          |
| Lã mineral                                             |                     | Como acima    |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |
| Lã de vidro                                            |                     | Como acima    |             |                                  |                                              |         |         |         |         |             |

Figura 18: Materiais usados para isolamento térmico externo. Fonte: Telles (2001).

### 3.10 Condensação e retorno de condensado

Para que uma linha de vapor atinja sua máxima eficiência é necessário que o condensado, formado quando o vapor perde calor para a tubulação de distribuição do mesmo, seja drenado no momento em que se forma para garantir o bom desempenho das trocas térmicas e para ser armazenado para voltar a caldeira ou para ser utilizado no processo. No momento em que o condensado é purgado, ele sai de uma linha de alta pressão para ser descarregado em pressão atmosférica. Essa mudança abrupta de pressão faz com que parte desse vapor evapore de novo produzindo vapor flash, o qual pode e deve ser reutilizado (PALACIOS, 2010; SPIRAX ARCO, 2005).

Se acontecer da velocidade de drenagem ser menor que a de formação do condensado ou se a vazão de vapor na entrada for maior que na saída, ocorrerá um acúmulo de condensado conhecido como alagamento, o qual reduzirá consideravelmente o desempenho da troca térmica e diminuirá o fluxo de calor (PALACIOS, 2010; SPIRAX SARCO, 2005).

#### 3.10.1 Sistema de retorno

O sistema de retorno é formado pelas tubulações que conduzem o condensado oriundo dos pontos de drenagem e dos equipamentos para um tanque de vapor flash, para o coletor de uma bomba de condensado ou diretamente para o tanque de alimentação da caldeira. Esses tubos devem ter uma inclinação de 14mm/metro na direção do seu destino assim como um isolamento adequado para reter energia térmica, e também um diâmetro apropriado, embora diâmetros grandes, além de diminuírem o ruído nas bombas e serem melhores para transportar vapor flash, também proporcionam menores quedas de pressão (U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, 2000; SPIRAX SARCO, 2004).

#### 3.10.2 Tipos de retorno

Existe o retorno alagado e o por gravidade, sendo que este último é o ideal, pois nesse tipo de retorno o condensado escoar por gravidade até o tanque coletor. Já o alagado recebe esse nome porque nesse tipo de retorno toda a tubulação fica alagada fazendo com que o condensado exerça contrapressão nos purgadores, no mínimo igual à coluna de água formada, sendo necessário que o condensado e o vapor flash sejam direcionados para um coletor o mais perto possível para então serem bombeados. Como é exemplificado na figura 19 abaixo (SPIRAX SARCO, 2012; RODRIGUES, 2012).

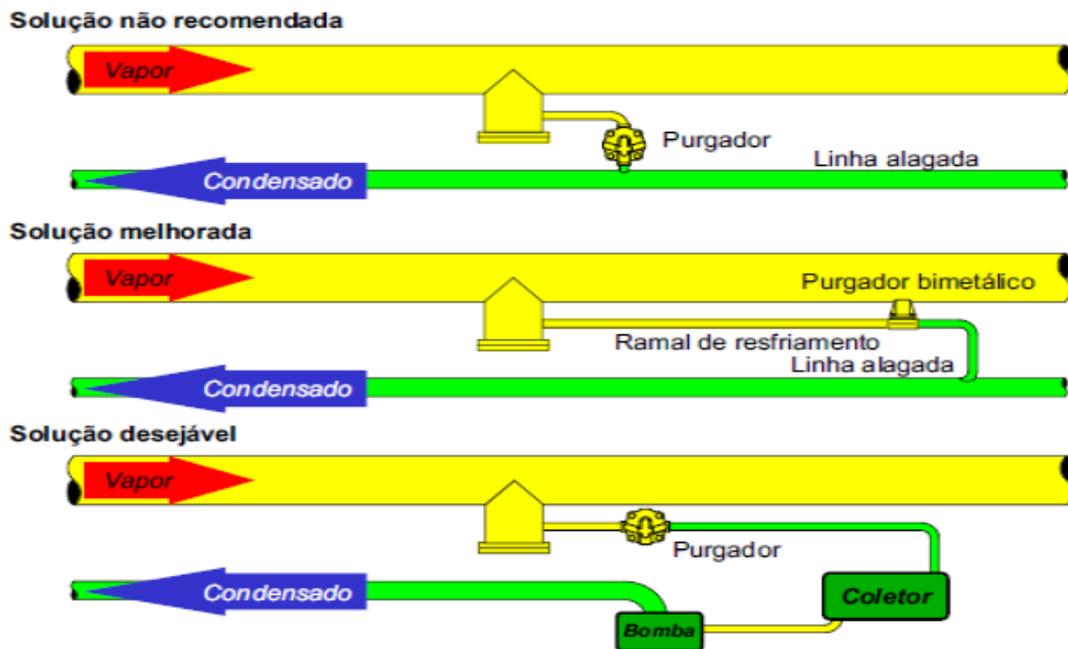


Figura 19: Linhas de retorno alagadas. Fonte: Spirax sarco (2012).

### 3.10.3 Transporte do condensado

Geralmente é preciso bombear o condensado que se acumula, seja num coletor ou num tanque, para um ponto mais alto como o tanque de alimentação da caldeira e, para isso, podemos usar bombas elétricas, a vapor ou a ar comprimido.

As bombas elétricas mais usadas são as centrífugas, tendo em vista que normalmente os tanques onde estão instaladas apresentam sistemas para controle de nível da água. Em contrapartida, não são indicadas para trabalhar com altas temperaturas nem com pouca coluna de alimentação.

Já as bombas a vapor ou a ar comprimido tem o diferencial de não apresentar cavitação, suportar altas temperaturas e operar por longo tempo sem apresentar problemas (SPIRAX SARCO, 2012; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

### 3.10.4 Tanques de alimentação e de condensado

Como boa parte da água que sai da caldeira em forma de vapor não retorna a ela devido as perdas do sistema, é necessário que ela tenha um reservatório de água para abastecê-la, o qual é chamado de tanque de alimentação. Além de armazenar a água tratada que vai alimentar a caldeira, ele também deve receber todo o condensado da linha, a não ser que este esteja comprovadamente contaminado. Esses tanques devem ser de metal, ter capacidade igual ou superior a da caldeira e devem manter a água entre 80 a 90

graus celsius usando o calor residual do condensado ou, quando necessário, injetando-se vapor em seu interior. Também é essencial que este tanque esteja corretamente dimensionado, pois seu subdimensionamento irá dificultar a condensação do vapor flash assim como ocasionar golpes e perdas de vapor para a atmosfera.

Os tanques de condensado como o próprio nome já evidencia, tem a finalidade de coletar e armazenar o condensado gerado no processo, para isso conta com o auxílio de bombas, que são instaladas neles. Também é função desses tanques, impedir a cavitação dessas bombas quando houver grandes variações no fluxo de condensado, principalmente na partida da caldeira (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2000; RODRIGUES, 2012).

### 3.10.5 Aproveitamento de vapor flash

O vapor flash é o condensado que reevaporou quando passou de uma linha de alta pressão para uma de baixa pressão. A recuperação desse vapor é essencial para se ter um sistema realmente eficiente.

O percentual de reevaporação irá depender da diferença de pressão entre a entrada e a saída do purgador e valores entre 5 e 15% são típicos, conforme figura 20. Quanto mais alta for a vazão e a pressão do condensado, mais vapor flash será formado (RODRIGUES, 2012; SPIRAX SARCO, 2004).

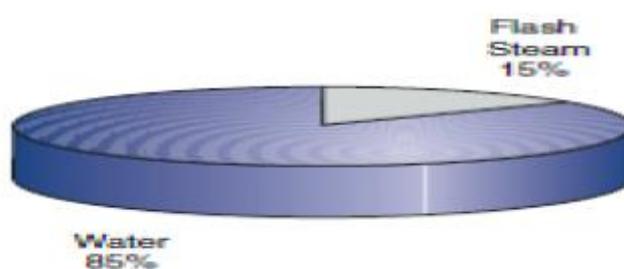


Figura 20: Quantidade de vapor flash em relação ao condensado. Fonte: Spirax sarco (2004).

O vapor flash pode conter quase 50% do calor total do condensado a ser retornado para o tanque de [água de alimentação, conforme figura 21 abaixo, o que faz com que sistemas de reaproveitamento de vapor reevaporado sejam parte essencial de qualquer sistema de vapor eficiente, pois cada quilo de vapor flash aproveitado é um quilo de vapor que a caldeira não precisará mais fornecer, o que significa menos custo e mais sustentabilidade ao processo (SPIRAX SARCO, 2012).

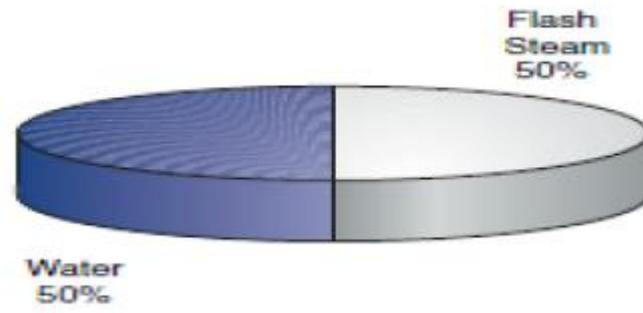


Figura 21: Quantidade aproximada de energia contida no condensado. Fonte: Spirax Sarco (2004).

## 4 METODOLOGIA

Primeiramente foi feito um levantamento de informações junto a empresa pesquisada, seguida de uma inspeção nos componentes do sistema de vapor, principalmente no tanque de retorno de condensado e, por fim, um estudo para se determinar como se calcula a quantidade de vapor flash que se forma em um sistema de vapor e as melhores e atuais formas de reaproveitá-lo.

### 4.1 Dados coletados no levantamento

Os seguintes dados foram considerados nas avaliações que foram feitas:

#### 1 Regime de trabalho:

- 24 horas por dia;
- 07 dias por semana;
- 52 semanas por ano;
- = Total de 8.736 horas por ano.

#### 2 Geração de vapor:

- Vazão média de vapor: 10.000 kg/h;
- Pressão de vapor: 15 bar;
- = Calor total na pressão de trabalho: 667,1 kcal/kg.

#### 3 Tanque de alimentação da caldeira / retorno de condensado:

- Condensado estimado para formação de vapor flash: 35% (3.500 kg/h);
- Temperatura do condensado retornado: 99,1 °C (sem o vapor reevaporado);
- Descarga de fundo na caldeira: 5% da vazão da caldeira = 550 kg/h;
- = Vazão de água de reposição: 6500 kg/h.
- Temperatura da água de reposição: 27 °C;
- = Temperatura do tanque de retorno (sem o vapor reevaporado): 95°C.

#### 4 Custo do vapor:

- = Custo do vapor: R\$ 156,22/ton
- Combustível: Gás Natural (100%);
- Poder calorífico inferior: 8.150 kcal/m<sup>3</sup>;
- Custo do combustível: R\$ 1,88/m<sup>3</sup>;

#### 5 Retorno de condensado:

- Pressão média dos processos: 8 bar;
- = Percentual de vapor reevaporado (considerando pressão atmosférica): 14,3%.
- = Potencial de vapor reevaporado para a atmosfera: 644,88 kg/h.
- = Potencial de desperdício: R\$ 870.425,17/ano.

## 4.2 Tanque de retorno de condensado

O tanque de retorno de condensado da instalação industrial é despressurizado, ou seja, está na pressão atmosférica e a maioria dos processos nestes setores trabalham na pressão de 10 bar, ou seja, neste caso este condensado é descarregado a uma temperatura de aproximadamente 184,1°C.



Figura 22: Tanque de retorno de condensado da empresa em questão. Fonte: Autor.

## 4.3 Procedimento para cálculo da quantidade de vapor flash

A quantidade de vapor reevaporado ou flash que se forma para cada quilograma de condensado pode ser calculado da seguinte forma:

$$TR = ((CSA - CSB) / CLB) * 100$$

Onde:

- TR = taxa de reevaporação (%);
- CSA = calor sensível à alta pressão (kcal/kg);
- CSB = calor sensível à baixa pressão (kcal/kg);
- CLB = calor latente à baixa pressão (kcal/kg).

Por exemplo, se 1 kg de condensado a 14 bar é descarregado para a atmosfera, ocorre a formação de 0,19 kg de vapor flash. Caso o condensado esteja a 7 bar, se produziria somente 0,134 kg de vapor flash, nas mesmas condições anteriormente mostradas.

Porém o gráfico da figura 23 abaixo também pode nos auxiliar neste cálculo. O exemplo no gráfico abaixo, o condensado descarregado a partir de uma pressão de 7 bar para a atmosfera terá 13,4% de sua massa transformada em vapor reevaporado.

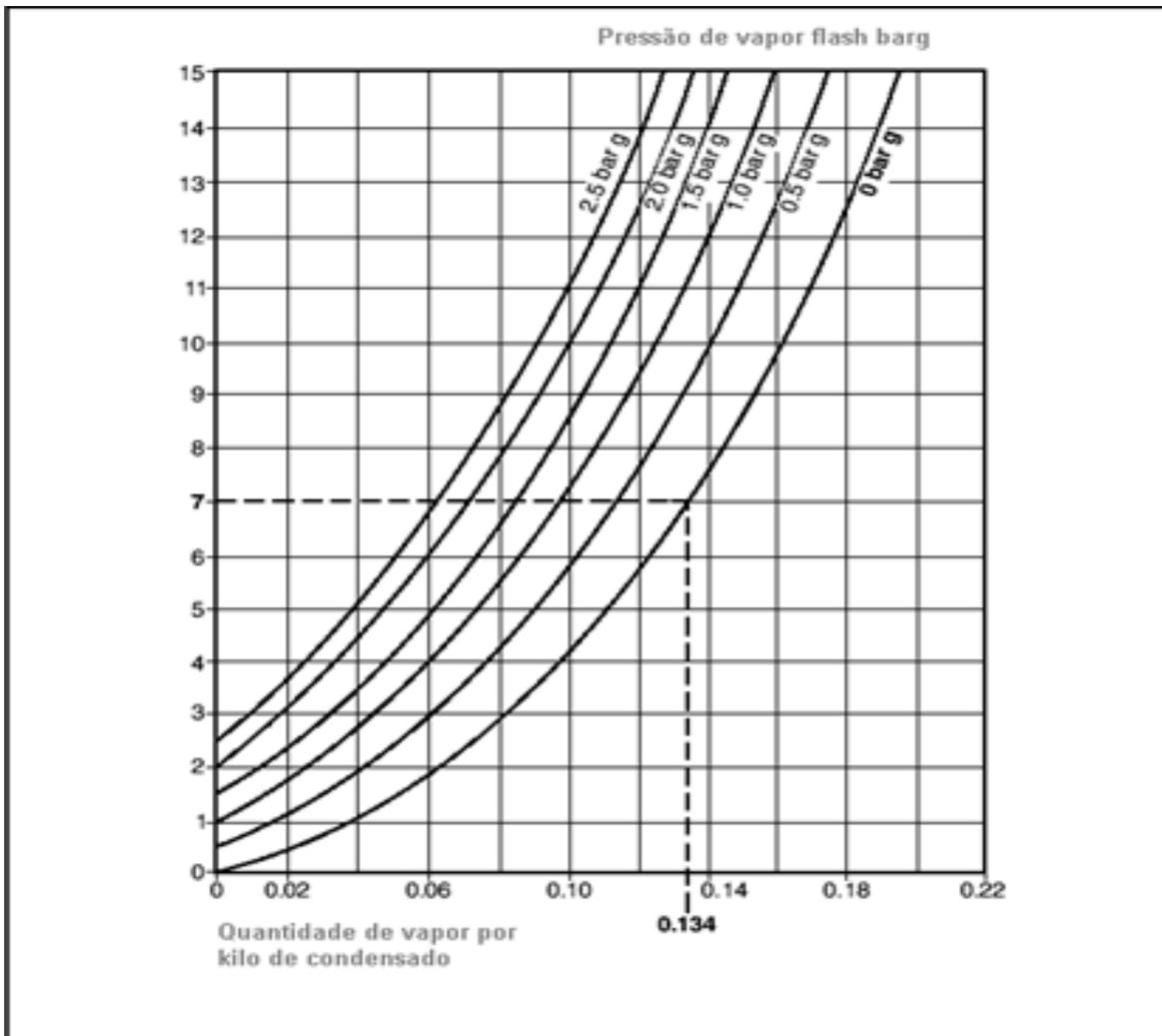


Figura 23: Gráfico para determinação de quantidade de vapor flash formado na despressurização. Fonte: Spirax sarco (2012).

#### 4.4 Formas de reaproveitamento de vapor

Atualmente há duas formas mais sugeridas e usadas de aproveitamento de vapor flash, que são:

##### Injeção de vapor reevaporado em tanque de alimentação da caldeira

Esta forma de recuperação adota a utilização de tanque de reevaporação de condensado, onde o vapor reevaporado é enviado para o tanque de alimentação da caldeira, e o condensado restante é bombeado para o mesmo tanque de alimentação da caldeira.

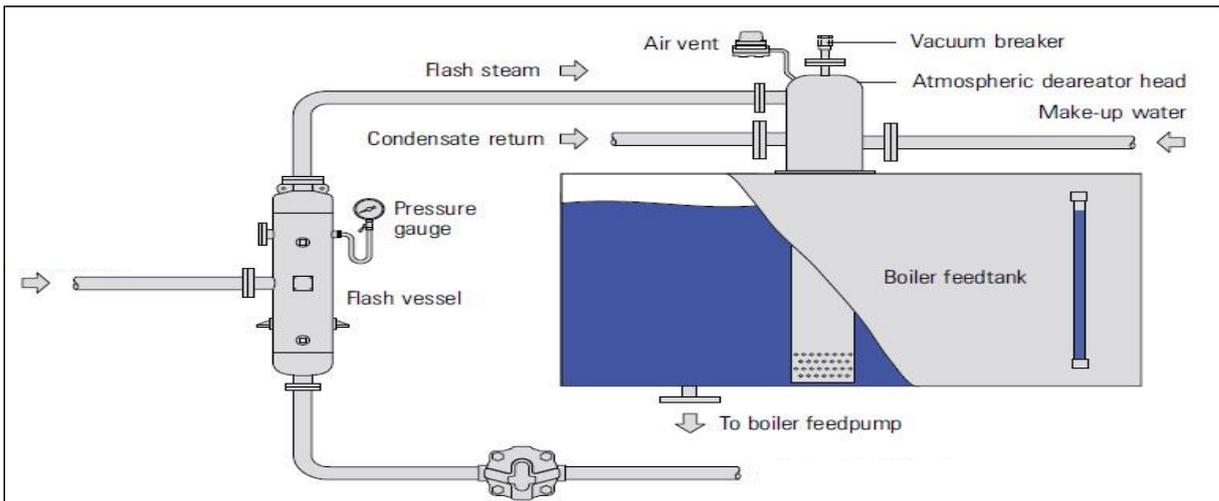


Figura 24: Esquema mostrando sistema de recuperação de vapor reevaporado com tanque. Fonte: Spirax sarco (2012).

##### Aquecimento de água de alimentação usando vapor reevaporado

Esta forma de recuperação adota a utilização de trocador de calor, onde o vapor reevaporado é utilizado para pré aquecer a água de alimentação da caldeira, resultando na condensação deste mesmo vapor reevaporado, que é desta forma retornado para o tanque de origem do vapor reevaporado.

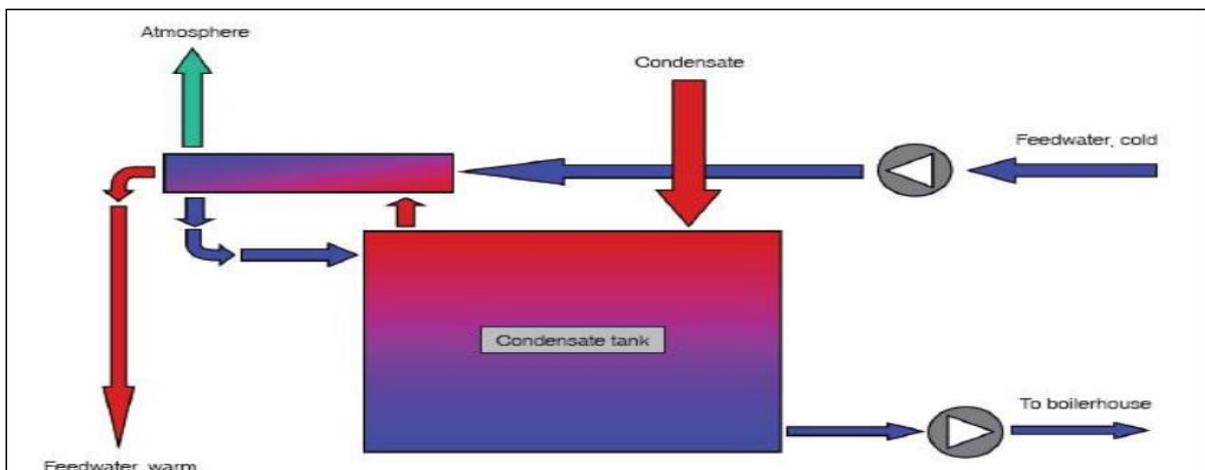


Figura 25: Esquema mostrando sistema de recuperação de vapor reevaporado com trocador de calor. Fonte: Spirax sarco (2012).

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 26: Porcentagem de vapor flash formado em relação a queda de pressão. Fonte: Spirax Sarco (2004).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entende-se que a solução que resulta em menos intervenção na planta, aproveita melhor os equipamentos existentes e oferece maiores ganhos energéticos e a que utiliza trocadores de calor para a recuperação de vapor flash.

O trocador recomendado apresenta as seguintes características:

- Um trocador especialmente dedicado para este fim é utilizado nesta solução, pois oferece baixa perda de carga, resultando em menos contrapressão nos purgadores que drenam condensado para os tanques de retorno de condensado atuais;
- Esta baixa perda de carga também resulta em melhor troca térmica;
- O trocador também possui uma conexão adicional que possibilita que o vapor condensado retorne diretamente para o tanque;
- O equipamento é de fácil instalação e não são necessários equipamentos adicionais, como válvulas de segurança e outros.

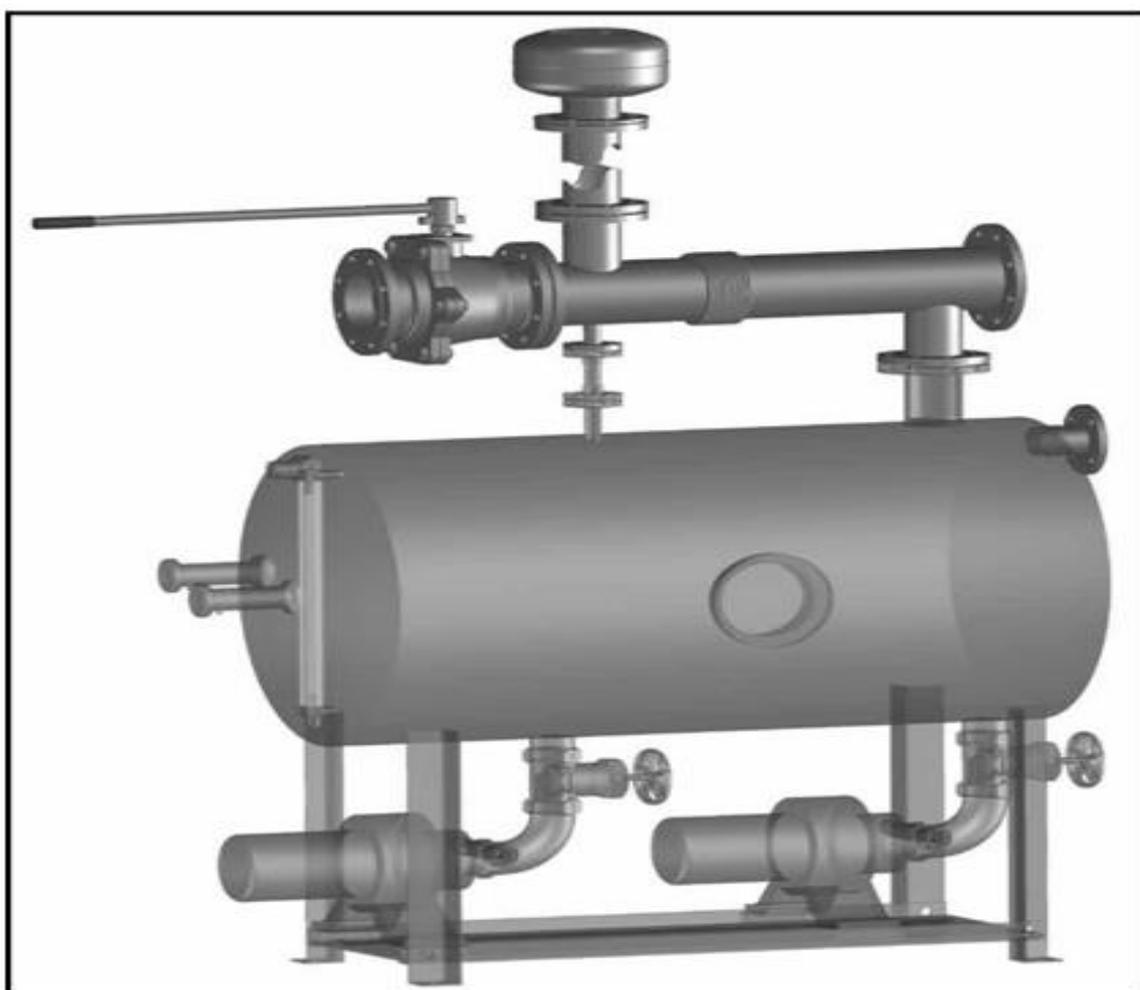


Figura 27: ilustração do condensador de vapor de exaustão, instalado em tanque. *Fonte: Spirax sarco (2012).*

### 5.1 Vantagens com a utilização de trocadores de calor

Apresenta-se a seguir as vantagens na utilização de trocadores de calor para a recuperação de vapor reevaporado:

- Trocadores de calor ficariam logo acima dos tanques de retorno de condensado atuais, não impondo contrapressão nos processos;
- O vapor flash proveniente da despressurização do condensado resultante da troca de calor seria novamente direcionado para o próprio trocador, eliminando as perdas de vapor;
- Trocadores de calor são fabricados em aço inox, resultando em maior vida útil dos mesmos.

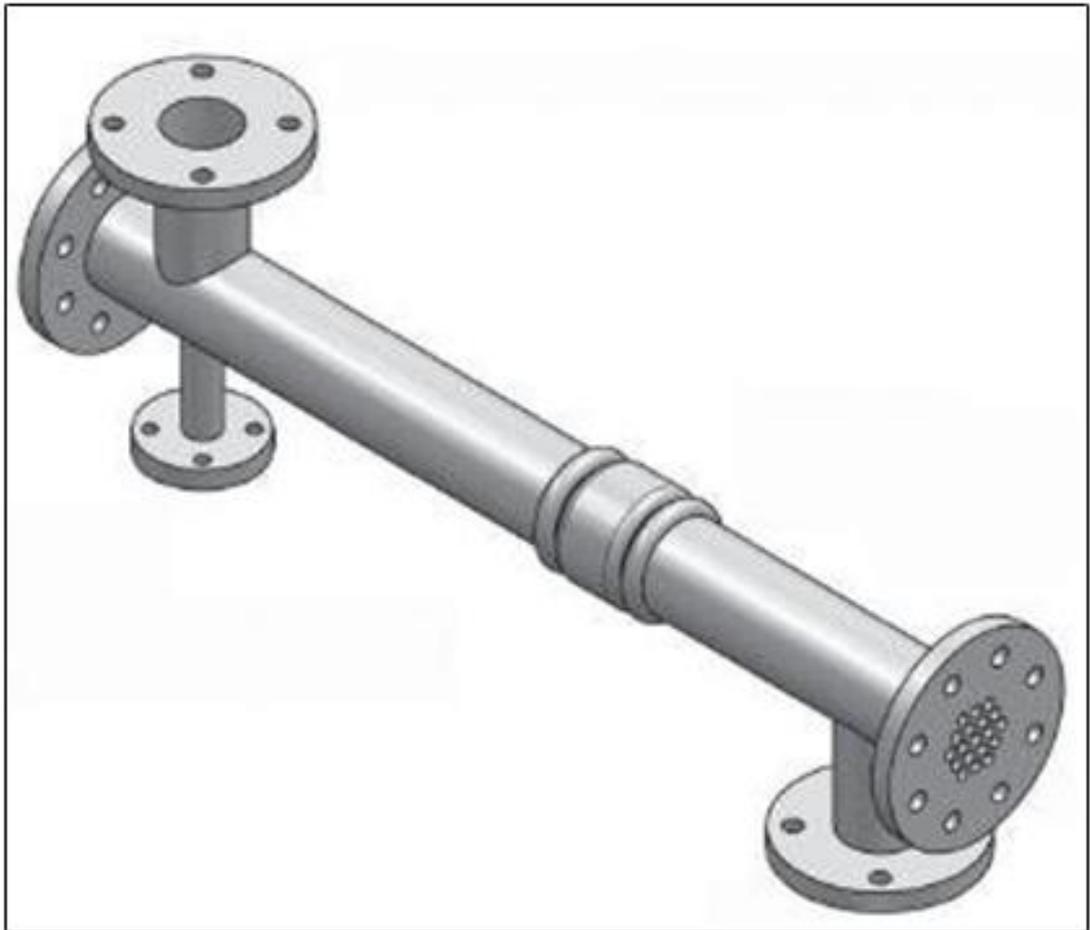


Figura 28: Trocador de calor EVC. Fonte: Spirax sarco (2012).

## 5.2 Ganhos do sistema

|                                                     | SEM REAPROVEITAMENTO   | COM REAPROVEITAMENTO |
|-----------------------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Temperatura da água de alimentação da caldeira      | 27°C                   | 85°C                 |
| Custo do vapor / ton                                | R\$ 156,22             | R\$ 140,60           |
| Volume de combustível para produzir 1 ton. De vapor | 83,1 m <sup>3</sup>    | 74,8 m <sup>3</sup>  |
| Custo anual com produção de vapor                   | R\$ 13.647.379,00      | R\$ 12.282.641,10    |
| Economia de                                         | R\$ 1.364.737,90 / ano |                      |

Figura 29: Comparativo entre os sistemas tradicional e com reaproveitamento. Fonte: Autor.



Figura 30: Gráfico da porcentagem de ganho com a implantação do sistema. Fonte: Autor.

### 5.3 Outros ganhos do sistema

Abaixo lista-se todas as vantagens do sistema proposto:

- Economia de energia – economia devido a redução de consumo de combustível (para cada 5,6 graus celsius de aumento na temperatura resultara numa economia de 1%);
- Economia de água – economia devido a menos água evaporada;
- Economia de tratamento químico;
- Aumento da eficiência da caldeira;
- Redução da emissão de CO<sub>2</sub> – responsabilidade ambiental;
- Solução mecânica - sem necessidade de automação / instrumentação;
- Sistema compacto – ocupa pouco espaço;
- Construção robusta: baixo custo de utilização;
- Componentes de alta qualidade: baixo custo de manutenção;
- Melhora a imagem da geração / utilização do vapor (menos vapor despejado para a atmosfera, operação ambientalmente correta).



Figura 31: Vapor despejado para a atmosfera. Fonte: Autor.

#### 5.4 Comparação entre resultados

|                                                       | <b>FALCÃO (2014)</b>        |                             |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                       | <b>SEM REAPROVEITAMENTO</b> | <b>COM REAPROVEITAMENTO</b> |
| <b>Temperatura da água de alimentação da caldeira</b> | <b>40°C</b>                 | <b>80°C</b>                 |
| <b>Economia de combustível</b>                        |                             | <b>8%</b>                   |

Figura 32: Resultados Falcão (2014). Fonte: Falcão (2014).

|                                                       | <b>SOUSA (2017)</b>         |                             |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                       | <b>SEM REAPROVEITAMENTO</b> | <b>COM REAPROVEITAMENTO</b> |
| <b>Temperatura da água de alimentação da caldeira</b> | <b>27°C</b>                 | <b>85°C</b>                 |
| <b>Economia de combustível</b>                        |                             | <b>11%</b>                  |

Figura 33: Resultados Sousa (2017). Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÃO

Tendo em vista que muitas empresas tanto no Brasil quanto ao redor do globo dependem da produção e do consumo de vapor em seus processos produtivos, o trabalho mostrou-se bastante relevante por ser um estudo sobre reaproveitamento energético em um sistema de vapor já instalado, pois indica o melhor sistema para o reaproveitamento do vapor outrora desperdiçado, comparando a eficiência do sistema sem e com reaproveitamento, além de poder ser replicado em outras empresas com a mesma problemática, o que vai gerar mais lucros e pode gerar aumento na produção e mais empregos.

O estudo também é importante a nível acadêmico, pois durante as pesquisas que foram a base para a produção do mesmo, percebeu-se que há poucos trabalhos acadêmicos com o tema abordado quando comparado com outros assuntos da engenharia mecânica.

Para mim, representou uma oportunidade de me destacar profissionalmente, pois ajudou-me a entender em pormenores como se consegue uma produção de vapor realmente eficiente do início ao fim do processo.

Por fim, pode-se afirmar que a implantação do sistema de reaproveitamento de trará significativos ganhos financeiros, pois proporcionará considerável economia de combustível, água e tratamento químico da mesma devido ao aumento da eficiência da caldeira.

### **Sugestão de novas pesquisas para o tema abordado:**

- Estudo de formas alternativas para reaproveitamento de condensado e vapor flash;
- Estudo para se determinar os principais fatores que causam ineficiência energética em sistemas de vapor e como resolvê-los;
- Estudo para aumentar a eficiência energética em sistemas de vapor por meio de um programa de medidas gerenciais e operacionais.

## 7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO EMPRESARIAL DE PORTUGAL. **Manual de boas práticas de eficiência energética**. Braga, 2010. Disponível em:

<[http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/manual\\_boas\\_praticas\\_energia\\_sustentar\\_web.pdf](http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/manual_boas_praticas_energia_sustentar_web.pdf)>. Acessado em: 15/03/2017.

BARRIGA, Alfredo. **Auditoria energética de un sistema de vapor**. Ministério de Energia: Dirección de energia Alternativa y Eficiencia Energéticos. Equador, 2012.

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

BOTELHO, Manuel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcello. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BOUREE, A; BEISSMANN, A.L.M. **uso final de energia na indústria têxtil**: um estudo de caso nas indústrias têxteis do segmento de tinturaria. Campinas: Universidade de Campinas, 2006.

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.

CHIARANTANO, Cláudio; SANTANA, Fernanda de Fátima. **Economizadores e Superaquecedores de Caldeiras**. São Paulo: Escola Politécnica – USP, 2008.

COSTA, S.T.; BRESTEL, L.O. **Managing a captive alkalinity boiler treatment program**. In: INTERNACIONAL WATER CONFERENCE, 40., 1989, Pittsburg.

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

\_\_\_\_\_. Manual Prático: **Eficiência energética no uso de vapor**. ELETRONBRAS Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2007.

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

GERNER, V. R. **Perda de carga e comprimento equivalente**. Nome do site. Ano. Disponível em: <[www.sp.senai.br](http://www.sp.senai.br)>. Acesso em: 03/04/2017.

HARRELL, Greg. **Steam System Survey Guide**. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 2002.

HOOPER, F.A.; GILLETE, R.D. Comparison of three preventive maintenance strategies for steam trap system. In: ANNUAL CONFERENCE INTERNACIONAL DISTRICT HEATING AND COOLING ASSOCIATION; 85.; 1994, Portland. **Conference Paper**. Portland: Internacional District Energy Association, 1994.

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

iyu

**Manual de Boas Práticas para Eficiência Energética**, Braga: AIMinho - Associação Empresarial. Soluciona – Sistemas de integrados de gestão, Ltda., 2010.

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.

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.

NAVITSKY, G.; GRABOWSKI, H.A. **Steam purity for industrial steam generators**. In: ANNUAL MEETING INTERNACIONAL WATER CONFERENCE , 39., Pittsbrug.

NOGUEIRA, L.A.H.; ROCHA, C.R.; NOGUEIRA, F.J.H. **Eficiência energética no uso do vapor: manual prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2002

NOGUEIRA, L.A.H. **Eficiência energética no uso do vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

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

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

SANTOS, A.C. **Caldeiras: conceitos envolvendo o funcionamento e operação de caldeiras**. Salvador: CETIND, 1991.

SARCO, Spirax. **Curso de Projetos de Sistema de Vapor**. 2005.

SCANAVINO, H.O. **Distribuição de vapor**. Sinatub. Disponível em: <[http://sinatub.com.br/media/artigos/Distribuicao\\_de\\_Vapor.pdf](http://sinatub.com.br/media/artigos/Distribuicao_de_Vapor.pdf)>. Acesso em: 25/04/2017.

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

\_\_\_\_\_. **Design of Fluid Systems: Steam Utilization**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2004.

\_\_\_\_\_. **Curso de Projetos de Sistema de Vapor**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2005.

\_\_\_\_\_. **The Steam and Condensate Loop Book**. Blythewood, SC: Spirax Sarco, 2011.

SOARES, J.J.L. **Economia de energia nos sistemas de vapor**. In: Curso de Economia de Energia na Indústria. Rio de Janeiro: IBP, 1982.

TELLES, P.C.S. **Tubulações industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ao livro técnico S.A., 1970.

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

TELLES, P.C.S. **Tubulações industriais: materiais, projetos e montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora S.A., 2001.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. Disponível em: <[http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf)>. Acesso em: 04/05/2017.

U. S. DAPARTAMENT OF ENERGY. **Steam Trap Performance Assessment**. Washington, DC: Advanced Manufacturing Office, 2000.

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

WANG, Lijun. **Food Efficiency and Management in Food Processing Facilities**. London: CRC Press, 2008.

ZATTONI, Célio Carlos. **Materiais para Tubulação**. São Paulo: FATEC-SP, 2008.