



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

KAÊ LEONE XIMENES DE LIMA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INSTALAÇÃO DE VAPOR DE  
UMA FÁBRICA DE EMBALAGENS DE PAPEL**

Recife

2021

KAÊ LEONE XIMENES DE LIMA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INSTALAÇÃO DE VAPOR DE  
UMA FÁBRICA DE EMBALAGENS DE PAPEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Curso de Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo.

Recife

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

- L732a Lima, Kaê Leone Ximenes de.  
Análise da eficiência energética em instalação de vapor de uma fábrica de embalagens de papel / Kaê Leone Ximenes de Lima. – 2021.  
73 f.: il., figs., quads, tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo.  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2021.  
Inclui referências.
1. Engenharia mecânica. 2. Vapor. 3. Purgadores. 4. Pressão. 5. Eficiência. 6. Condensado. 7. Energia. 8. Térmica. I. Figueiredo, Flávio Augusto Bueno (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-20

KAÊ LEONE XIMENES DE LIMA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INSTALAÇÃO DE VAPOR DE  
UMA FÁBRICA DE EMBALAGENS DE PAPEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Curso de Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 31/08/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profª. Dra. Janaína Moreira de Meneses  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, que me conduziu durante toda a minha jornada, e por me ajudar a superar todos os obstáculos vivenciados até aqui.

Agradeço à minha mãe Gilvânia Ximenes, por acreditar na educação de qualidade como ferramenta fundamental para minha formação como ser humano, e por todo amor, carinho e dedicação que me foi proporcionado, serei eternamente grato por tudo que foi feito por mim.

Agradeço ao meu pai Jairo Lima e à Janaina Bezerra, pessoas que foram fundamentais desde o início dessa jornada, que contribuíram através de muito apoio, amor e compreensão em cada obstáculo que enfrentei, na vida e na graduação, sem eles eu não estaria aqui.

Agradeço à minha avó Lenice Maria Ximenes, que com muito amor me ensinou lições que levo para toda minha vida, e que sempre se mostrou disponível para me ajudar e me dar o devido suporte nos momentos que precisei.

Agradeço à minha irmã Lysa Ximenes, que me proporciona grande força de vontade para ultrapassar todas as barreiras que encontro, visando um futuro cada vez melhor para ela.

Agradeço à minha noiva Alana Duque, por toda paciência e compreensão durante toda a minha jornada, pelo amor, pela parceria e por compartilhar de todos os momentos e dificuldades vividas até aqui, sua parceria foi fundamental para que eu pudesse continuar me esforçando, e prometo retribuir com um futuro repleto de felicidade.

Agradeço ao meu primo Junior Ximenes, que com muita empatia sempre se mostrou disponível para me ajudar com os desafios encontrados na minha graduação e na minha vida, serei sempre grato por sua amizade e companheirismo.

Agradeço à EIXO Consultoria, lugar onde aprendi e me desenvolvi muito, pessoalmente e profissionalmente, além de ter me proporcionado grandes amigos. Foi, sem dúvida, a melhor experiência que tive durante a universidade.

Agradeço ao meu amigo de vida e companheiro de curso Gabriel Galindo, que me proporcionou grande ajuda ao longo de todos esses anos e, sem dúvidas, foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo, pela compreensão, empatia e orientação ao meu trabalho, onde foi fundamental para que eu pudesse concluir essa importante etapa da minha vida.

Agradeço também a todos os professores do curso de graduação em Engenharia Mecânica da UFPE, assim como também agradeço a empresa Spirax Sarco, que contribuíram diretamente para minha formação e evolução como pessoa e profissional.

## RESUMO

O vapor é de fundamental importância na indústria de embalagens de papel, tendo em vista que possui a tarefa de aquecer os cilindros que dão forma ao papelão corrugado, o qual é utilizado para fabricação de diferentes tipos de embalagens. Em um circuito de vapor, a preocupação com a economia de energia nas etapas de geração de vapor, distribuição de vapor, utilização de vapor e retorno de condensado, servem como motivação para o desenvolvimento de soluções sustentáveis, que atuam com o objetivo de proporcionar maior eficiência energética, através de um menor consumo de combustível. Através de uma metodologia bem definida, foi possível identificar algumas oportunidades de melhoria nas diferentes etapas da instalação de vapor de uma fábrica de embalagens de papel, como a melhoria da qualidade do vapor, a correção de vazamentos em purgadores, a redução da pressão de utilização do vapor e a adequação da drenagem ao longo da linha de distribuição. Por fim, essas oportunidades foram detalhadas, assim como as suas respectivas soluções propostas, que geraram uma economia potencial de R\$27.052,27/mês a partir de um investimento de R\$54.519,53, além de proporcionar benefícios qualitativos, resultando em um retorno de investimento de aproximadamente 2 meses.

**Palavras-chave:** vapor; purgadores; pressão; eficiência; condensado; energia; térmica.

## ABSTRACT

Steam is of fundamental importance in the paper packaging industry, as it has the task of heating the cylinders that form the corrugated cardboard, which is used to manufacture different types of packaging. In a steam circuit, a concern with energy savings in the steps of steam generation, steam distribution, use of steam and condensate return, seeking as a motivation for the development of sustainable solutions, which work with the objective of providing greater energy efficiency through lower fuel consumption. Through a well-defined methodology, it was possible to identify some opportunities for improvement in the different stages of steam installation in a paper packaging plant, such as an improvement in steam quality, a correction of leaks in traps, a reduction in the use pressure of steam and the adequacy of drainage along the distribution line. Finally, these opportunities were listed, as well as their proposed solutions, which generated a potential savings of BRL 27.052,27 / month from an investment of BRL 54.519,57, in addition to providing qualitative benefits, back in a return investment period of approximately 2 months.

**Keywords:** steam; traps; pressure; efficiency; condensed; energy; thermal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Diagrama P-V de uma substância pura	16
Figura 2 -	Curva de saturação líquido-vapor para água	18
Figura 3 -	Diagrama PV da água com indicação do título	19
Figura 4 -	Caldeira flamotubular de tubos horizontais	21
Figura 5 -	Caldeira flamotubular de tubos verticais	21
Figura 6 -	Caldeira Aquotubular	22
Figura 7 -	Inclinação da tubulação e escoamento do condensado	25
Figura 8 -	Dimensionamento de botas coletoras.	28
Figura 9 -	Ilustração do acúmulo e arraste de condensado	29
Figura 10 -	Imagem interna de um purgador tipo boia	33
Figura 11 -	Imagem interna de um purgador tipo balde invertido	34
Figura 12 -	Imagem interna de um purgador termodinâmico de disco	35
Figura 13 -	Imagem interna de um purgador termostático	36
Figura 14 -	Câmera termográfica para inspeção	37
Figura 15 -	Medidor de vazão ultrassônico modelo UE Systems UP-100	37
Figura 16 -	Esquema do circuito de um sistema de vapor	38
Figura 17 -	Processo de produção de caixas de papelão corrugado	44
Figura 18 -	Composição do papelão corrugado	45
Figura 19 -	Caldeira da fábrica em estudo	46
Figura 20 -	Plaqueta da caldeira da fábrica em estudo	46
Figura 21 -	Manômetro indicando pressão do interior da caldeira	48
Figura 22 -	Resumo dos resultados da inspeção	52
Figura 23 -	Resumo da inspeção em porcentagem	52
Figura 24 -	Arraste de condensado em uma bota coletora	54
Figura 25 -	Mecanismo de separação de umidade	54
Figura 26 -	Ponto recomendado para instalação do separador	55
Figura 27 -	Linha de distribuição	56
Figura 28 -	Ponto de drenagem inadequado no final da linha	56
Figura 29 -	Bota coletora para drenagem ao longo da linha	57
Figura 30 -	Ponto de drenagem no final da linha	57
Figura 31 -	Mesa da máquina de fabricação de papelão corrugado	59
Figura 32 -	Ilustração de uma estação redutora de pressão auto-operada	61

Figura 33 -	Ilustração da estação redutora da Etapa 1	65
Figura 34 -	Ilustração da estação redutora da Etapa 2	68
Figura 35 -	Relação temporal entre investimento e economia mensal	68

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classificação quanto à aplicação dos tubos

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Emissão de calor de uma tubulação de aço livremente exposta ao ar 20°C	26
Tabela 2 -	Fator de isolamento (f)	26
Tabela 3 -	Aumento na emissão devido ao movimento do ar sobre a tubulação	27
Tabela 4 -	Formação de condensado em kg/h a cada 30 metros	27
Tabela 5 -	Espessura de isolamento em silicato de cálcio	31
Tabela 6 -	Vapor saturado, relação entre pressão, volume específico e calor latente	40
Tabela 7 -	Informações das caldeiras da série M3P	47
Tabela 8 -	Tabela para vapor d'água em estado de saturação	49
Tabela 9 -	Resumo dos dados operacionais	50
Tabela 10 -	Tipos de diagnóstico na inspeção	51
Tabela 11 -	Condição por tipo de purgador	53
Tabela 12 -	Comparação do calor latente nas pressões avaliadas (Autor)	59
Tabela 13 -	Investimento para aquisição de novos purgadores	62
Tabela 14 -	Investimento para aquisição do separador de umidade	63
Tabela 15 -	Investimento para aquisição de equipamentos para pontos de drenagem	63
Tabela 16 -	Investimento para aquisição da estação redutora de pressão para etapa 1	65
Tabela 17 -	Investimento para aquisição da estação redutora de pressão para etapa 2	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1	O VAPOR .....	16
3.2	RELAÇÃO TEMPERATURA E PRESSÃO .....	17
<b>3.2.1</b>	<b>Título ou qualidade do vapor saturado .....</b>	<b>18</b>
3.3	CALDEIRAS E A GERAÇÃO DE VAPOR .....	19
<b>3.2.1</b>	<b>Classificação .....</b>	<b>20</b>
3.2.1.1	Caldeiras flamotubulares .....	20
3.2.1.2	Caldeiras Aquatubulares .....	21
3.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS EM TUBULAÇÕES E TRASPOTE DE VAPOR .....	22
<b>3.3.1</b>	<b>Dimensionamento .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Materiais da tubulação e aplicações .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Formação de condensado .....</b>	<b>24</b>
3.3.3.1	O golpe de aríete .....	28
<b>4</b>	<b>EQUIPAMENTOS PARA TUBULAÇÕES DE VAPOR .....</b>	<b>30</b>
4.1	ISOLAMENTO TÉRMICO DA TUBULAÇÃO .....	30
4.2	PURGADORES DE VAPOR E DRENAGEM DE CONDENSADO .....	31
<b>4.2.1</b>	<b>Tipos de purgadores .....</b>	<b>32</b>
4.2.1.1	Purgadores mecânicos .....	32
4.2.1.2	Purgadores termodinâmicos .....	34
4.2.1.3	Purgadores termostáticos .....	35
<b>4.2.2</b>	<b>Inspeção de purgadores .....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR .....</b>	<b>38</b>
5.1	OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE VAPOR .....	38
5.2	OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR .....	39
5.3	OPORTUNIDADES NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR .....	40
5.4	OPORTUNIDADES NO RETORNO CONDENSADO .....	41
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>

6.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	44
6.2	DADOS OPERACIONAIS .....	45
<b>6.2.1</b>	<b>Informações da caldeira .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
7.1	CUSTO DO VAPOR .....	48
7.2	OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS .....	51
<b>7.2.1</b>	<b>Inspeção nos purgadores de vapor .....</b>	<b>51</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Recomendações referentes à inspeção de purgadores .....</b>	<b>53</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Qualificação do vapor após a saída da caldeira .....</b>	<b>53</b>
7.2.3.1	Recomendações referentes à qualificação do vapor .....	54
7.2.3.2	Pontos de drenagem .....	55
7.2.3.3	Recomendações para drenagem de condensado .....	57
<b>7.2.4</b>	<b>Redução de pressão .....</b>	<b>58</b>
<b>7.2.5</b>	<b>Recomendações referentes à redução de pressão .....</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO E INVESTIMENTOS .....</b>	<b>62</b>
8.1	ESPECIFICAÇÃO DOS PURGADORES DANIFICADOS .....	62
8.2	ESPECIFICAÇÃO DO SEPARADOR DE UMIDADE .....	63
8.3	ESPECIFICAÇÃO DAS BOTAS COLETORAS E DRENAGEM PARA FINAL DE LINHA .....	63
<b>8.3.1</b>	<b>Estação redutora para etapa 1 .....</b>	<b>64</b>
<b>8.3.2</b>	<b>Estação redutora para etapa 2 .....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>RESUMO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>10</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O vapor de água foi bastante associado inicialmente à locomotivas e a revolução industrial, sua aplicação foi se tornando mais circunscrita à medida que os motores elétricos e outras alternativas à utilização do vapor foram surgindo em diferentes meios industriais. Atualmente, o vapor é utilizado como parte essencial em diversos setores da indústria moderna, por exemplo, o vapor saturado é extensamente utilizado em indústrias químicas, alimentícias, têxteis e farmacêuticas, e a aplicação do vapor superaquecido é comumente destinada para geração de energia em turbinas de alta pressão (Coggiola, 2016).

Entre os diversos setores industriais, o vapor pode ser aplicado como fonte de aquecimento em diferentes tipos de processos, entre eles podemos citar: trocadores de calor, evaporadores, secadores, tanques de aquecimento, cilindros secadores, reatores químicos e outros processos térmicos, que variam desde ao aquecimento de um produto à uma esterilização de uma ferramenta de trabalho.

O vapor atualmente é amplamente utilizado na indústria por diversas razões, a relação direta entre a pressão e temperatura do vapor saturado torna bastante acessível o controle de energia através da alteração da pressão do vapor. Além disso, o volume do vapor também diminui conforme sua pressão aumenta, apresentando uma grande capacidade de acúmulo de energia em um volume reduzido, tornando fácil o seu procedimento de transporte. Por fim, a água é abundante e não é tóxica, representando uma forma segura e eficiente de armazenamento de energia em sua forma gasosa (Togawa, 2017).

Por outro lado, a aplicação prática do vapor na indústria também nos leva a uma série de desafios em diferentes etapas e processos de uma planta, é necessário lidar com procedimentos como o dimensionamento adequado de linhas de distribuição, pontos de drenagem de condensado, acúmulo de condensado, isolamento térmico, pressão adequada para aplicação do vapor e diversos outros fatores que devem ser analisados para promover maior eficiência energética e segurança operacional ao sistema (Ferreira, 2018).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a instalação de vapor de uma fábrica de embalagens de papel de forma a obter economia de energia.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar problemas relacionados ao funcionamento dos purgadores, acúmulo de condensado, qualidade e pressão do vapor em seu processo de distribuição e utilização.
- Avaliar melhorias no processo de geração de vapor
- Indicar soluções técnicas para economia de energia
- Quantificar custos de implantação de melhoria do processo
- Avaliar o retorno de investimento em melhoria.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

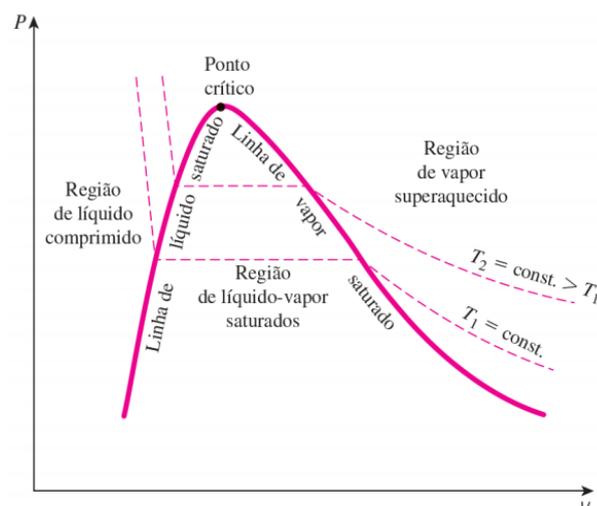
#### 3.1 O VAPOR

Podemos entender o vapor como o gás formado quando a água muda do seu estado líquido para o estado gasoso. Na indústria, o vapor é gerado através de caldeiras, que aquecem a água até sua temperatura de saturação em uma determinada pressão estabelecida, fazendo com que a mudança de estado físico ocorra. Isso acontece pois quando fornecemos energia a uma certa quantidade de água, o grau de agitação das moléculas aumenta a nível suficiente para quebrar as ligações interatômicas, dando início ao processo de ebulição.

A energia térmica total disponível no vapor, calor, pode ser compreendida pela soma de duas parcelas de energia, sendo elas o calor latente e o calor sensível. O calor latente é a quantidade de energia necessária para alterar o estado físico da água em sua temperatura de ebulição, sem sofrer alterações em sua temperatura. O calor sensível é a energia responsável pelo aumento da temperatura da água, mas sem alterar o seu estado físico. Dependendo da pressão do vapor, o calor latente representa entre 70% e 80% do valor total da energia contida do vapor (Dias, 2012).

Dependendo das condições de temperatura e pressão a que uma substância como a água está submetida, esta pode ser classificada em categorias diferentes como: vapor saturado, vapor superaquecido, líquido saturado e líquido comprimido, conforme o esquema apresentado na figura 1, que se trata de um diagrama pressão-volume de uma substância pura.

Figura 1 -Diagrama P-V de uma substância pura



Fonte: Cengel, 2006.

A linha de vapor saturado é o limite de saturação. Para o vapor, todos os estados de líquido comprimido estão localizados na região localizada à esquerda da linha de líquido saturado. A região de vapor superaquecido está localizada à direita da linha de vapor saturado. Nessas duas regiões existe apenas um estado físico, líquido ou vapor. Por fim, todos os estados que contém ambas as fases coexistindo se localizam sob a curva, na região de líquido-vapor saturado (Yunus A. Cengel, 2006).

O vapor na indústria é produzido em caldeiras e sua aplicação como vapor saturado é amplamente utilizada como fonte de aquecimento. Isso acontece pois em condições de vapor saturado é possível transferir todo o calor latente contido no vapor, fazendo com que o mesmo volte ao seu estado líquido após ceder essa parcela de energia. Nessas condições temos a formação do condensado à temperatura constante, que agora contém apenas a energia proveniente da parcela do calor sensível. Por fim, o condensado ainda pode ser reaproveitado como fonte de alimentação de água na caldeira, sendo uma fonte de água já pré-aquecida, proporcionando economia de combustível na geração de vapor.

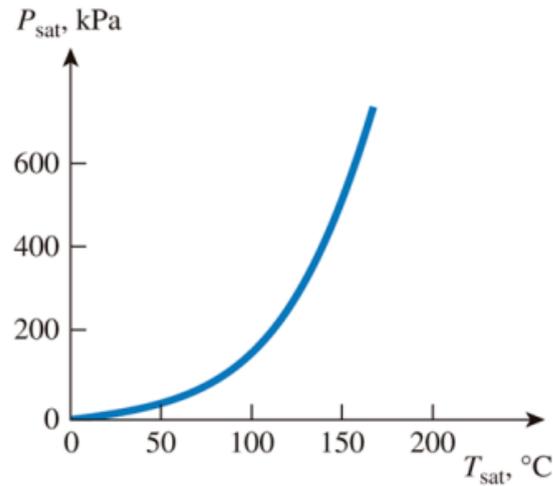
Segundo Nogueira (2014), o vapor saturado atualmente é aplicado em diversos processos industriais, como por exemplo o aquecimento de máquinas, tubulações ou camisas de reatores, além de ser utilizado para processos de esterilização de equipamentos.

Por outro lado, o vapor superaquecido é utilizado para a movimentação de máquinas como bombas e turbinas, onde é desejável o aproveitamento da energia mecânica. Sua aplicação normalmente se dá em turbinas com a finalidade de produzir energia elétrica e, nesse caso, o vapor não deve possuir gotículas para que não ocorra problemas relacionados à corrosão no equipamento (Spirax Sarco, 2021).

### 3.2 RELAÇÃO TEMPERATURA E PRESSÃO

A temperatura que a água inicia o processo de ebulição depende da pressão, por exemplo, em 1 atm temos que a temperatura de ebulição da água é de 100° C (Cengel, 2006). Essa característica proporciona ao vapor uma vantagem extremamente competitiva em relação a outras alternativas de aquecimento na indústria, pois existe uma relação direta entre a temperatura e pressão do vapor, ou seja,  $T_{sat} = f(P_{sat})$ , conforme podemos ver na figura 2:

Figura2 -Curva de saturação líquido-vapor para água



Fonte: Cengel, 2006.

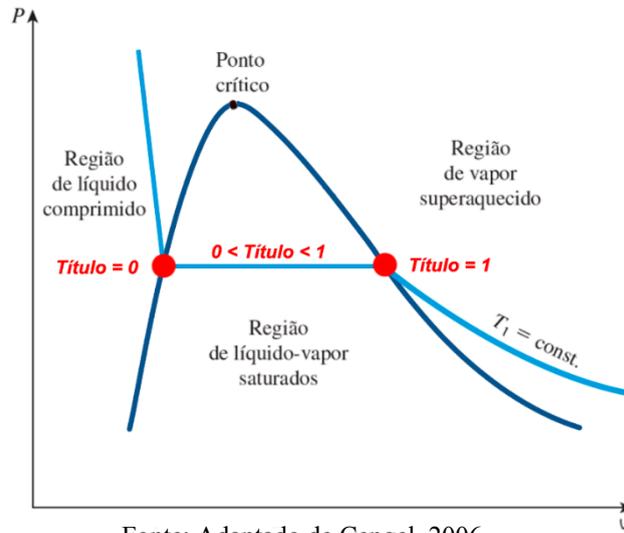
Com a leitura do gráfico fica claro que quando a pressão aumenta, a temperatura também aumenta, sendo o inverso também verdadeiro, tornando assim intuitivo e simples o princípio do controle da temperatura dos processos de aquecimento através da alteração da pressão do vapor.

### 3.2.1 Título ou qualidade do vapor saturado

Sabemos que o vapor saturado é uma mistura entre vapor e água e, portanto, o título é um indicador da quantidade de água presente no vapor. O vapor saturado seco existe quando o título é 1 e possui qualidade de 100%. Por outro lado, temos líquido comprimido quando o título é igual a 0 ou qualidade de 0% (Cengel, 2006). Na figura 3 é possível visualizar a região de vapor saturado no diagrama PV da água (Pressão e volume). Por fim, não faz sentido falar em título nas regiões de líquido comprimido ou vapor superaquecido, onde temos apenas um estado físico.

Na indústria o ideal é buscar um maior título possível para o vapor saturado, ou seja, utilizar o vapor mais seco possível, pois um vapor de baixa qualidade é mais propício à formação e acúmulo de condensado ao longo das tubulações, proporcionando problemas relacionados à corrosão e golpes de aríete, além de diminuir a eficiência na troca térmica nos processos de produção.

Figura3-Diagrama PV da água com indicação do título



### 3.3 CALDEIRAS E A GERAÇÃO DE VAPOR

No século XVIII surgiram as primeiras máquinas cujo objetivo era proporcionar a geração de vapor, isso ocorreu pois na época a queima direta do carvão fóssil como fonte de calor já era inconveniente e, conseqüentemente, a busca por outras alternativas viabilizaram o desenvolvimento das primeiras unidades geradoras de vapor. Esses equipamentos nasceram a partir da necessidade de gerar, captar, transportar e distribuir a energia liberada por um combustível aos pontos de consumo de uma fábrica (Bazzo, 1995).

Os geradores de vapor são trocadores de calor robustos e complexos, que através da energia proveniente de um combustível e um elemento comburente (ar), produzem o vapor em pressões maiores que a atmosférica (Leite, 2013).

Na indústria, a grande maioria dos processos necessitam da produção de vapor saturado, que é feita através de caldeiras, em pressões geralmente inferiores a 10 bar (g). Por outro lado, os processos que envolvem serviços de acionamento mecânico necessitam de vapor superaquecido, que possuem pressão de trabalho geralmente maiores, por exemplo, atualmente existem centrais termelétricas que operam com vapor superaquecido a uma pressão de cerca de 250 bar (g) (Bazzo, 1995).

A NR-13 é a norma regulamentadora nº 13 do Ministério do Trabalho do Brasil e estabelece os parâmetros mínimos para operação, manutenção, inspeção e instalação de caldeiras a vapor. Segundo a NR-13 (2019), caldeiras a vapor são equipamentos destinados a

produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares.

A produção de vapor saturado na indústria é realizada através de caldeiras que, em uma explicação simplificada, podemos dizer que são máquinas que contém um reservatório de água que é aquecido através de uma fonte de calor contínua, proveniente de algum combustível, proporcionando assim a geração de vapor. Sendo assim, o vapor gerado é distribuído através de tubulações, e o nível de água dentro da caldeira deve ser restabelecido à medida que é reduzido (Leite, 2013).

### **3.2.1 Classificação**

Segundo Alfatini (2002), os principais tipos de caldeiras podem ser classificadas como:

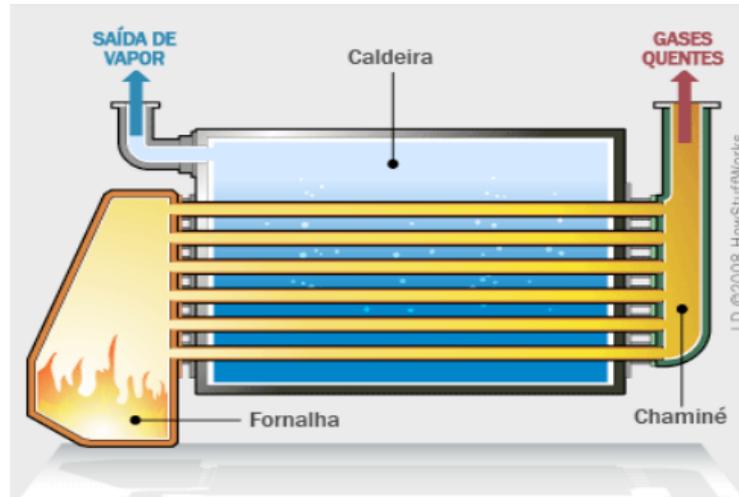
- Flamotubulares
- Aquatubulares.

#### **3.2.1.1 Caldeiras flamotubulares**

Nas caldeiras flamotubulares temos a circulação interna dos gases de combustão, em outras palavras os tubos conduzem os gases por todo o interior da caldeira, possibilitando a troca de calor com a água contida no reservatório, que percorre a área ao redor dos tubos (Nogueira, 2014).

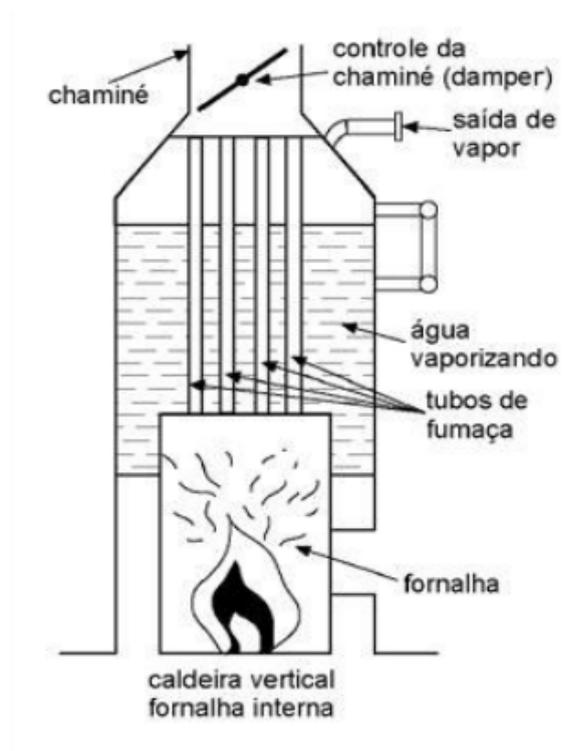
Segundo Alfatini (2002), as caldeiras flamotubulares são limitadas em termos de capacidade de produção de vapor e pressão, pois as partes internas são submetidas a uma alta pressão, o que inviabiliza o emprego de chapas de metal de maiores espessuras. Em geral alcançam até 15 ton/h a uma pressão de trabalho de até 18 bar (g). Alfatini ainda ressalta que os tubos podem estar em posição horizontal, como podemos visualizar na figura 4, ou vertical, como podemos visualizar na figura 5, porém as caldeiras horizontais são muito mais comuns, podendo ser fabricadas com fornalhas lisas ou corrugadas.

Figura4 - Caldeira flamotubular de tubos horizontais



Fonte: DeqWiki, 2019.

Figura5 - Caldeira flamotubular de tubos verticais



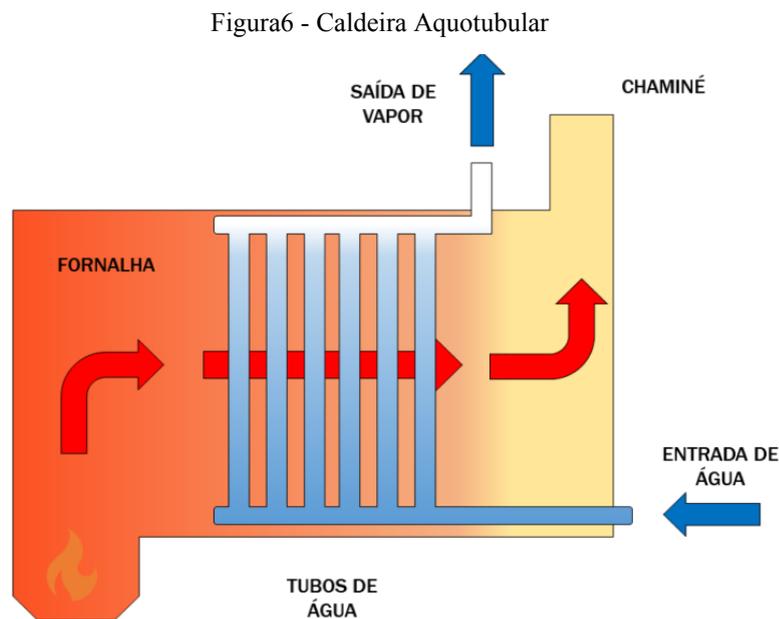
Fonte: Leite; Militão, 2008.

### 3.2.1.2 Caldeiras Aquatubulares

Nas caldeiras Aquatubulares é o inverso, a água percorre o interior dos tubos e é aquecida pelos gases de combustão que são gerados na fornalha e passam pela superfície

exterior dos tubos, conforme mostra a figura 6. Por possuir uma área de troca térmica maior, as caldeiras aquatubulares possuem uma capacidade produtiva maior (Nogueira, 2014).

As caldeiras aquatubulares possuem vasos pressurizados internamente de menores dimensões relativas e, conseqüentemente, isso viabiliza de forma técnica e econômica o emprego de chapas com maiores espessuras, suportando assim maiores pressões. Vale ressaltar que nesse tipo de caldeira temos como instalar um superaquecedor, viabilizando o fornecimento de vapor superaquecido (Altafini, 2002).



Ainda podemos citar as caldeiras mistas, que possuem partes flamotubulares e partes aquatubulares, embora sejam raras (Altafini, 2002).

### 3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS EM TUBULAÇÕES E TRASPOTE DE VAPOR

Segundo Zattoni (2008), o tubo é um conduto oco e fechado, geralmente circular e destinado ao transporte de fluidos. Tubulações são conjuntos de tubos, válvulas, conexões e acessórios que juntos formam uma linha para condução e distribuição de um fluido desejado. Em uma linha de distribuição de vapor é de fundamental importância que alguns pontos relacionados à tubulação sejam considerados, tais como o dimensionamento, a formação de condensado, o isolamento e o material da tubulação.

### 3.3.1 Dimensionamento

Segundo Daumichen (1975), existem dois principais métodos de dimensionamento de tubulação de sistemas de vapor, o método da perda de carga e o método da velocidade. No método da velocidade os cálculos são feitos estimando uma determinada velocidade de escoamento do fluido, tomando também como base o volume específico do vapor e a área da seção transversal do fluido. São indicadas velocidades entre 20 e 35 m/s para vapor saturado. Este método não prevê o comprimento da tubulação.

Em tubulações de grande comprimento o método da velocidade se torna impreciso e precisamos considerar as perdas de cargas existentes, que podem ser surpreendentemente grandes. Teremos melhores resultados ao utilizar o método da perda de carga, que nos fornece dados de pressão e, conseqüentemente temperatura, em qualquer ponto da tubulação. Existem inúmeros gráficos, monogramas e tabelas para o dimensionamento da tubulação pelo método da perda de carga, facilitando sua aplicação na prática (Daumichen, 1975).

Makarenko (1975) explica que os tubos de aço projetados para tubulações de vapor são fabricados em uma série de diâmetros nominais, que são expressos em polegadas, e para cada diâmetro nominal são disponíveis diversas espessuras de parede. A padronização mais difundida para os tubos aplicados à condução de vapor é a ANSI B 36.10, que define essas espessuras através do “Schedule Number”.

### 3.3.2 Materiais da tubulação e aplicações

O aço carbono é amplamente utilizado em tubulações de vapor e diversos outros fluidos, é um material de uso geral em tubulações industriais, pois apresenta excelente custo benefício ao considerarmos suas ótimas qualidades mecânicas e facilidade na conformação. Nas indústrias de processamento o aço carbono está presente em mais de 80% dos tubos, é o material recomendado para transporte de fluidos como vapor, óleo, ar comprimido e outros fluidos pouco corrosivos (Pederiva e Mattioni, 2013).

Os tubos de aço carbono podem trabalhar em temperaturas de até 400°C para vapor, como exemplo de tubulações fabricadas em aço carbono ASTM A106, que são tubulações projetadas para altas temperaturas. Para temperaturas superiores ou para atender algum requisito que o aço carbono não atenda, os aços de baixa liga são usuais, com adição de elementos como molibdênio e cromo, para melhorar as propriedades de resistência e oxidação a altas temperaturas, podendo resistir a temperaturas de até 600°C (Makarenko p.52, 1975).

Abaixo temos o quadro 1, que mostra as classificações dos tubos quanto à sua aplicação, com a especificação do seu respectivo material.

Quadro 1 - Classificação quanto à aplicação dos tubos.

<b>Tubos para condução</b>	
Preto ou galvanizado	Tubos para condução de fluidos não corrosivos (água, gás, vapor e ar comprimido).
Aço ligado	Tubos para condução de fluidos corrosivos.
Aço inox	Tubos para condução de fluidos corrosivos ou sanitários.
<b>Eletrodutos</b>	
Tubos para proteção de fios e cabos elétricos.	
<b>Tubos industriais</b>	
Tubos de aço carbono para estruturas, andaimes, postes, cercas e escoras.	
<b>Tubos mecânicos</b>	
Tubos de seção circular, para aplicações industriais, tais como: fabricação de auto peças, equipamentos, móveis, etc., onde exatidão dimensional, qualidade de superfície e propriedades mecânicas são importantes. Tubos mecânicos de precisão, laminados ou trefilados para indústrias automobilísticas.	
<b>Tubos para troca térmica</b>	
Tubos para caldeiras, trocadores de calor e condensados, tubos de aço carbono com e sem requisitos especiais e tubos de aço carbono para alta performance.	

Fonte: Zattoni p.30, 2008.

### 3.3.3 Formação de condensado

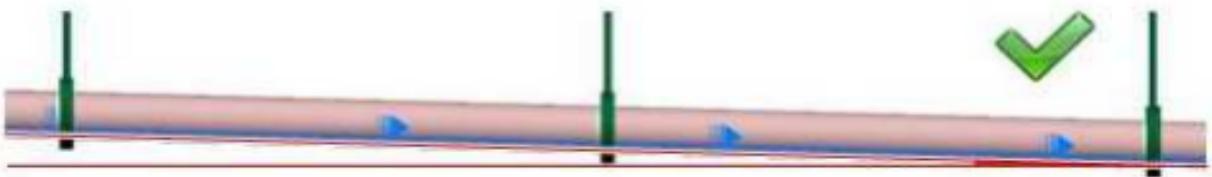
É importante ressaltarmos a necessidade de considerar a formação de condensado ao longo da linha de distribuição. Podemos explicar o condensado como simplesmente sendo o

vapor que perdeu calor e voltou ao estado líquido. Sebastião (2006) explica que o condensado não tem ação motora e nem aquecedora, pois a energia de aquecimento é proveniente do calor latente que já foi cedido pelo vapor. Além disso, a entrada do condensado nos equipamentos diminui bastante a eficiência de troca térmica, é recomendado a sua retirada das tubulações e equipamentos a vapor.

Para Makarenko (1975), em qualquer sistema de tubulação de vapor sempre irá ocorrer a condensação devido às perdas por radiação, mesmo em linhas bem isoladas. Makarenko ainda cita um exemplo de uma tubulação de 4” com 30m de comprimento, isolada, transportando vapor à 7,04 kg/cm<sup>2</sup> e temperatura ambiente de 10°C, nessas condições ao final de duas horas a tubulação terá, além do vapor, cerca de 32 kg de condensado formado, resultando em uma taxa de condensação de 16 kg/h.

O processo de formação de condensado ocorre de maneira contínua e fazem-se necessárias providências para proporcionar a sua retirada da tubulação. Uma prática simples para evitar o acúmulo de condensado e proporcionar o seu escoamento é inclinar a tubulação, conforme podemos ver na figura 7, essa inclinação é em cerca de 0,5% no sentido do fluxo do vapor, por exemplo, em uma tubulação de 100m, uma das extremidades deve possuir uma altura 0,5m inferior em relação a outra. Além da drenagem que é realizada com purgadores em pontos estratégicos onde ocorre o acúmulo do condensado escoado (Pederiva e Mattioni, 2013).

Figura 7 – Inclinação da tubulação e escoamento do condensado



Fonte: TLV, 2021.

Sabemos que o condensado nada mais é do que a própria água que alimentou a caldeira, onde se transformou em vapor, cedeu calor e voltou ao estado líquido. Sendo assim, é uma boa prática, ambiental e financeira, considerar o retorno do condensado para o sistema de alimentação da caldeira. Vale ressaltar que existe diferença entre a água de alimentação da caldeira e o condensado presente nas tubulações e deve-se considerar o tratamento do condensado neste caso (Costa, 2006).

É possível calcular a quantidade de condensado que é gerada durante na distribuição do vapor durante a operação do sistema, esse cálculo envolve fatores e dados necessários como

otaxa de emissão de calor da tubulação, entalpia do vapor, comprimento total da tubulação e outros pontos importantes. Segundo a Eletrobrás (2005), a equação é especificada abaixo:

(1)

Onde,

- Vazão de vapor condensado (kg/h);

Q–Taxa de emissão de calor (W/m);

L–comprimento total da tubulação (m);

hfg - entalpia do vapor (kJ/kg); e

f – Fator de isolamento.

Nota: f = 1 para tubulação não isolada

(O fator 3,6 fornece o resultato em kg/h)

A Eletrobrás ainda cita um exemplo, considerando uma tubulação de 120 metros e de 4", transportando vapor à 10 bar (g), com temperatura à 184,1°C e entalpia do vapor de 1995,5 kJ/kg, e com temperatura ambiente de 20°C. Na tabela 1 podemos consultar taxa de emissão de calor (W/m) da tubulação considerando a diferença de temperatura entre o ar e a tubulação, para o exemplo foi adotado 1090 W/m.

Tabela 1 - Emissão de calor de uma tubulação de aço livremente exposta ao ar 20°C

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

2005.

Fonte:  
Eletrobrás,

Além disso, conforme mostra a tabela 2, foi considerado um isolamento de 50mm para tubulação, o que representa um fator de aproximadamente 0,085, conforme podemos constatar abaixo:

Tabela 2 - Fator de isolamento (f)

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

Fonte: Eletrobrás, 2005.

Sendo assim, temos que:

Além desses dados, também pode ser considerado um fator de aumento na emissão de energia se a superfície da tubulação estiver submetida ao ar em movimento. Para o exemplo podemos considerar essa situação, adotando uma velocidade do ar de 3m/s, proporcionando um fator igual a 2, conforme podemos consultar na tabela 3. Com esses dados, multiplicando o resultado encontrado pelo fator, teríamos um total de aproximadamente 40,10 kg/h formado.

Tabela 3 - Aumento na emissão devido ao movimento do ar sobre a tubulação

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

Fonte:

Eletrobrás, 2005.

Em contrapartida, a tabela 4 pode ser utilizada como estimativa para determinar a quantidade de condensado de forma mais prática. Através dela, é possível conferir a quantidade de vapor formada nas tubulações de vapor a cada 30m de comprimento, foi considerado um isolamento de 80% de eficiência e temperatura ambiente a 22°C (Spirax Sarco, 2004).

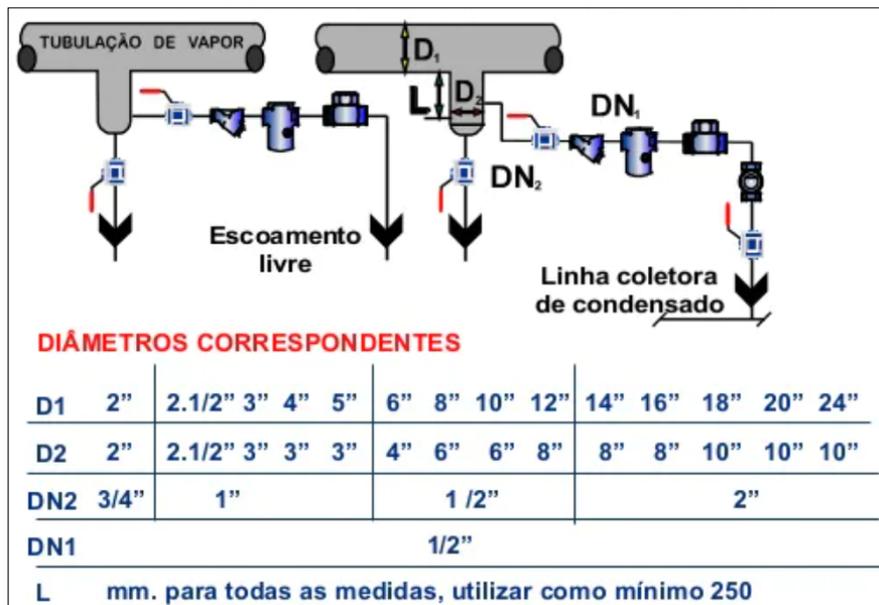
Tabela 4– Formação de condensado em kg/h a cada 30 metros.

Pressão kg/cm <sup>2</sup>	Diâmetro												
	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"
0.7	2.7	3.1	4.0	4.9	7.2	9	11	13	14	16	17	20	24
2.1	3.6	4.0	4.9	6.3	8.9	12	14	17	19	21	22	25	30
4.2	4.5	5.4	6.3	8.0	12.0	15	18	22	24	28	30	33	40
7.0	5.4	6.7	8.0	9.8	14.7	18	23	27	30	34	37	42	50
8.5	5.8	7.2	8.9	10.7	16.1	20	25	30	33	38	40	45	54
12.0	7.1	8.5	10.3	11.6	17.0	24	30	35	38	44	48	53	63
17.5	8.1	9.8	12.1	15.2	22.3	28	34	41	45	52	56	53	75
21.0	8.9	11.2	13.4	16.5	24.1	30	38	45	50	56	62	69	82

Fonte:Spirax Sarco, 2004.

Por fim, para o dimensionamento de botas coletoras de condensado ao longo da linha de distribuição, a Spirax Sarco, recomenda seguir a instrução exposta na figura 8, onde a partir do diâmetro da tubulação, é possível especificar de forma adequada o diâmetro e comprimento da bota coletora, assim como o diâmetro dos equipamentos do conjunto de purga, como purgadores, filtro Y e válvulas de bloqueio.

Figura 7 - Dimensionamento de botas coletoras.



Spirax Sarco,

Fonte:  
2021.

3.3.3.1 O  
aríete

golpe de

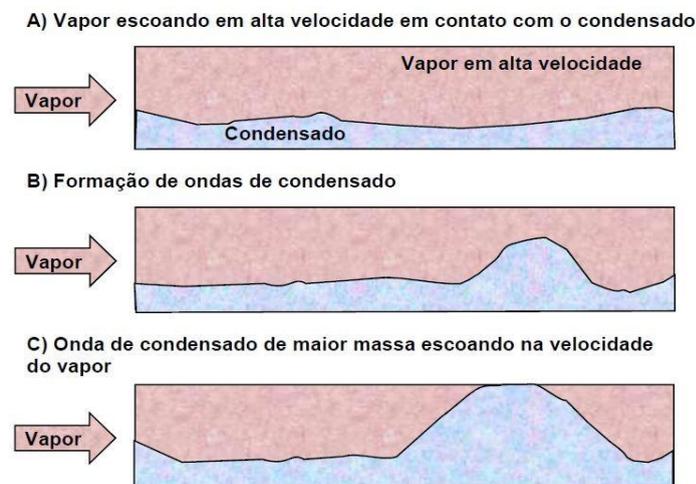
É válido ressaltar que a maioria dos líquidos não sofrem compressão, ou seja, não importa o quanto de pressão é aplicada, o volume não sofre alteração. O que se deve ter cuidado ao fechar válvulas de certas tubulações, pois a água ao se mover pela tubulação vai acumulando energia, sendo assim, ao fechar o sistema repentinamente, a energia não tem para

onde flui devido a falta de compressão dos líquidos e com isso não consegue amortecer o fechamento e a energia é dissipada por uma onda de choque que percorre a tubulação, aumentando a sua pressão e ocasionando um fenômeno denominado de golpe de aríete (Barbosa, 2010). O condensado formado nas tubulações de vapor atua como líquido incompressível e o seu acúmulo também pode trazer problemas para a integridade da tubulação.

Pela etimologia da palavra, aríete vem do latim aries, podendo ser traduzido como “vaivém”, sendo o nome de um antigo equipamento utilizado para arrombar portas e desconjuntar muralhas (Dulong, 2020).

Em tubulações de vapor o golpe de aríete pode ocorrer principalmente por conta de mudanças de direção das tubulações, extremos de tubulações, válvulas e outros equipamentos, que podem servir como obstáculos para a passagem de uma grande quantidade de condensado acumulado, que quando não drenado corretamente, é empurrado pela alta velocidade do vapor, como mostra a figura 9 (Cardoso, 2018).

Figura 9 - Ilustração do acúmulo e arraste de condensado



O impacto resultante do acúmulo de condensado em consideráveis taxas de fluxo resultam em altos ruídos, assim como também proporciona o enfraquecimento das tubulações e seus respectivos suportes. Dependendo da velocidade da quantidade e velocidade do condensado, o impacto pode ser grande o suficiente para desprender a tubulação e proporcionar acidentes de trabalho, gerando um risco operacional considerável. Podemos

afirmar que o golpe de aríete é um dos maiores problemas ocasionados pela deficiência no sistema de drenagem de condensado (ALONZO, 2017).

## **4 EQUIPAMENTOS PARA TUBULAÇÕES DE VAPOR**

Com o intuito de minimizar e conter a formação de condensado, existem alguns equipamentos que podem ser instalados nas linhas de distribuição de vapor, como o isolamento térmico adequado e as botas coletoras para drenagem de condensado com diferentes tipos de purgadores, e em alguns casos também são instalados mecanismos para qualificação do vapor, como separadores e coletores distribuidores de vapor (Spirax Sarco, 1995).

### **4.1 ISOLAMENTO TÉRMICO DA TUBULAÇÃO**

Segundo Zatonni (2008), o isolamento térmico tem como principal objetivo a conservação de energia em tubulações e equipamentos que trabalham em baixas ou altas temperaturas, além da proteção dos operadores e da prevenção do congelamento do vapor de água do ar em determinada superfície.

Quanto ao isolamento aplicado em sistemas de vapor, deve-se ter em mente que todas as superfícies que possam perder calor devem ser isoladas, incluindo flanges, conexões, tubulações e válvulas. A perda de energia por falta de isolamento tem como consequência queima desnecessária de combustível e desperdício financeiro, além disso, também haverá a formação de uma grande película de condensado nas paredes internas, que impactará drasticamente a qualidade do vapor (Pagy, 1975).

Telles (1987), citado por Pederiva e Mattioni (2013), informa que a temperatura do vapor e o diâmetro da linha são os dois principais fatores para especificar a espessura do isolamento.

Os isolantes térmicos convencionais armazenam em seu interior uma grande quantidade de ar, que praticamente não transmite calor por convecção. Os melhores isolantes

desse tipo possuem condutibilidade térmica de aproximadamente 0,03 Kcal/h.m.°C, que é próxima a do ar, que possui valor de 0,02 Kcal/h.m.°C (Eletrobrás, 2005).

Segundo a Eletrobrás(2005), temperaturas de até 60°C são suportáveis pelo ser humano em um eventual contato, sem causar danos aos tecidos da pele. Ou seja, a superfície da cobertura do isolante não deve ser superior à 60°C, e essa consideração simplifica a especificação da espessura, através do uso de tabelas e gráficos fornecidos por diferentes fabricantes. Na tabela 5 é possível conferir as espessuras de isolamento recomendadas a depender da temperatura da superfície do tubo e do seu diâmetro nominal.

Por fim, é válido ressaltar a necessidade de uma análise de viabilidade econômica para instalação de isolamento térmico em tubulações com temperaturas mais baixas.

Tabela 5 - Espessura de isolamento em silicato de cálcio.

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

Fonte: Eletrobrás, 2005.

## 4.2 PURGADORES DE VAPOR E DRENAGEM DE CONDENSADO

Pode-se afirmar que, o purgador é um dispositivo mecânico automático, que tem como função eliminar algum fluido que não deveria estar presente na tubulação, já que pode alterar o desempenho do sistema, deixando apenas o fluido útil para o processo. Sendo assim, o purgador é fundamental no sistema de vapor, onde se abre para que ocorra a eliminação do ar, de gases incondensáveis e condensado de vapor, não permitindo a perda de vapor vivo (DECOL, 2012).

Os purgadores de vapor geralmente são instalados em dois casos típicos e distintos. O primeiro se trata do purgador instalado na linha de distribuição, onde possui a função de eliminar o condensado à medida que o vapor é transportado aos equipamentos. O segundo caso é a utilização do purgador diretamente nos equipamentos, com objetivo de reter o vapor no processo de aquecimento e deixar sair apenas o condensado (Eletrobrás, 2005).

É de fundamental importância ressaltar que não se tem um purgador que possa ser utilizado de forma adequada para diversas situações e equipamentos diferentes, pois não existe um tipo de purgador universal e, para cada processo, será necessário especificar o tipo de purgador que melhor atende às necessidades do sistema, levando em consideração o princípio de funcionamento de cada tipo de purgador (Silva, 2013).

#### **4.2.1 Tipos de purgadores**

É possível encontrar três grupos diferentes de purgadores que se diferenciam pelo seu tipo de acionamento. Eles são classificados como termostáticos, mecânicos e termodinâmicos (PALÁCIOS, 2010).

##### **4.2.1.1 Purgadores mecânicos**

Os purgadores mecânicos, também conhecidos como purgadores de densidade, operam sob o princípio de gravidade específica, ou seja, pela diferença nas gravidades específicas entre o vapor e o condensado. Com isso, um elemento se movimenta em um determinado sentido, atuando sobre o orifício de descarga. Tendo como uma de suas principais diferenças a capacidade de operar com resposta precisa de acordo com o fluxo de condensado sem o comprometimento de seu desempenho pela maioria dos fatores externos (Silva, 2013).

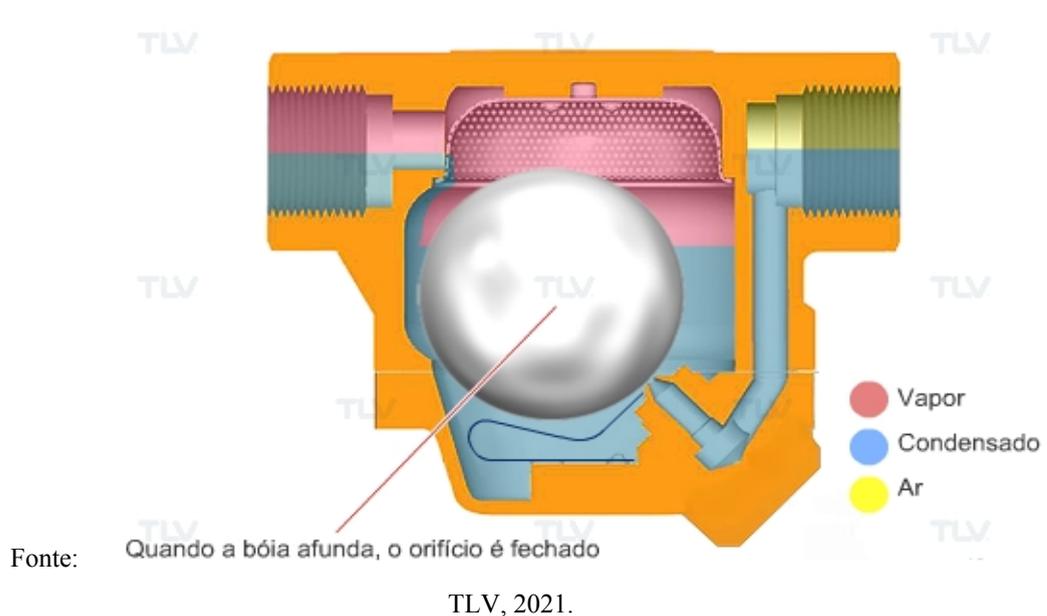
##### **a) Purgador tipo boia:**

Entre os purgadores mecânicos podemos citar o purgador do tipo bóia, o qual é amplamente utilizado em diversos processos industriais. Este purgador possui internamente um orifício para entrada de vapor e condensado e outro orifício apenas para saída de condensado, além de possuir um sistema “sede”, que funciona como uma válvula que abre o orifício para a passagem de condensado sem deixar que o vapor também passe, a sede suporta uma boia flutuante que é responsável pela abertura e fechamento do orifício de acordo com o nível de condensado presente dentro do purgador, como podemos visualizar na figura 10.

Sendo assim, uma mínima quantidade de condensado presente no purgador proporciona uma abertura equivalente do orifício e por conta disso o purgador tipo boia possui a característica de drenagem contínua de condensado (Eletrobrás, 2005).

O purgador tipo boia também possui um eliminador termostático de ar instalado como um componente interno, que remove de forma automática o ar e os gases não condensáveis que se acumulariam dentro do purgador (Eletrobrás, 2005).

Figura 10 - Imagem interna de um purgador tipo boia.



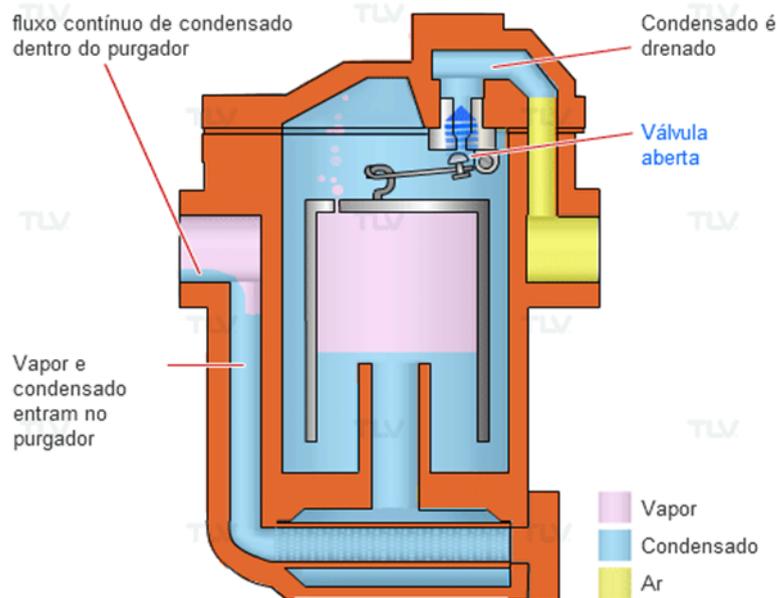
Por fim, por responderem imediatamente a variações de pressão e vazão, os purgadores tipo bóia são adequados para drenagem de trocadores de calor, painéis de cozimento, serpentinas de aquecimento, reatores e outros processos onde a carga de condensado é contínua. Também podem possuir eliminador de vapor preso, nesse caso são adequados para drenagem de cilindros secadores em indústrias de papel, têxtil e outras (DECOL, 2012).

#### b) Purgador de balde invertido:

Neste modelo de purgador o corpo contém um orifício para entrada de condensado, e existe um segundo orifício com válvula onde ocorre a eliminação do ar acumulado e condensado. A válvula é acionada por uma peça semelhante a um balde com o bocal voltado para baixo, de acordo com seu nível de flutuação, como mostra a figura 11. Dentro do balde ainda existe um terceiro orifício, cuja finalidade é fluir os gases e condensar o vapor que se

acumula na região, permitindo que apenas condensado alcance o orifício de drenagem (Eletrobrás, 2005).

Figura11 - Imagem interna de um purgador tipo balde invertido.



Fonte: TLV, 2021.

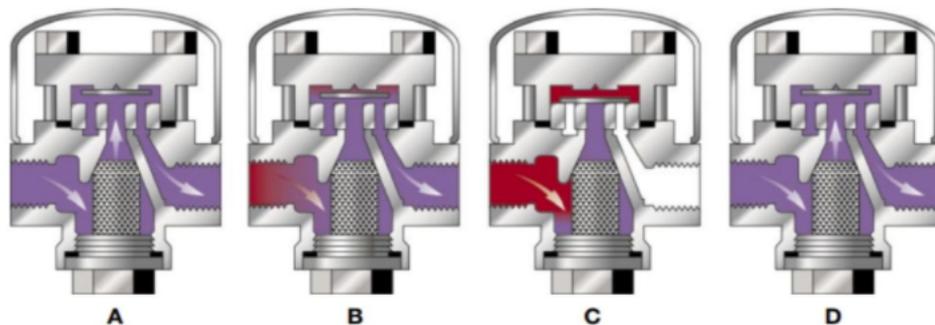
#### 4.2.1.2 Purgadores termodinâmicos

O purgador termodinâmico tem seu funcionamento baseado na diferença de energia cinética entre o vapor de alta velocidade e condensado resfriado, onde este último possui movimento mais lento. O purgador termodinâmico de disco é amplamente utilizado na indústria e é constituído de três partes, sendo elas corpo, tampa e disco (Do Carmo Leite, 2013).

Seu princípio de funcionamento é através de um disco que é localizado dentro de uma pequena câmara, o disco faz o trabalho de abrir ou fechar o orifício de drenagem. Ao chegar condensado ou ar, empurrados pela pressão do vapor, o disco é levantado e a drenagem é

realizada. Ao chegar vapor, parte do vapor chega a escapar e sua alta velocidade cria uma zona de baixa pressão abaixo do disco, que começa a abaixar criando um espaço acima do disco que é preenchido por vapor, como consequência o disco é forçado para baixo através da pressão aplicada sob a área da superfície circular. Por fim, à medida que o disco abaixa, a região de passagem de vapor diminui, aumentando a velocidade do vapor e depressão causada, fazendo com que o disco encoste na sede e bloqueie a saída do vapor, como processo mostrado na figura 12. O ciclo se repete quando novamente chega o condensado frio, que proporciona a condensação do vapor que se encontra preso acima do disco, proporcionando um diferencial de pressão suficiente para levantar o disco e ocorrer a drenagem novamente (Eletrobrás, 2005).

Figura 12 - Imagem interna de um purgador termodinâmico de disco.



Fonte: Vapor para la industria, 2021.

Seu princípio de funcionamento proporciona um sistema de drenagem intermitente, onde o purgador purga o condensado em intervalos de tempos de alguns segundos. Atrélado a isso, o purgador do tipo termodinâmico é barato, de baixa manutenção e pode ser empregado em altas pressões e temperaturas, o que torna sua aplicação ideal para linhas de distribuição de vapor. Por fim, são purgadores construídos inteiramente em aço inox e podem ser sujeitos a severas condições de operação (Eletrobrás, 2005).

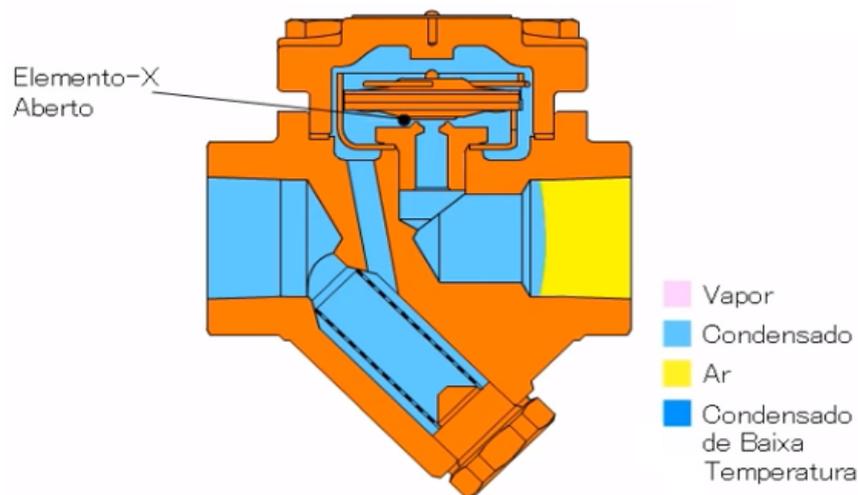
#### 4.2.1.3 Purgadores termostáticos

Os purgadores termostáticos tem seu funcionamento baseado na diferença de temperatura entre o vapor e o condensado, que é sensibilizado por um elemento termostático. Para ser eliminado o condensado deve atingir uma temperatura abaixo da temperatura de

saturação, ou seja, esse tipo de purgador retém o condensado até que o mesmo perca seu calor sensível a ponto de baixar suficientemente a sua temperatura. A temperatura que um purgador termostático abre é variável, mas está entre 10° e 30°F abaixo da temperatura do vapor saturado para pressão existente. Neste grupo estão os purgadores bi-metálicos, de pressão balanceada e purgador termostático de expansão líquida (Silva, 2013).

A respeito do funcionamento de um purgador termostático, podemos ver na figura 13 o elemento X, que representa o elemento termostático, onde está permitindo a passagem do condensado frio. Em situações onde temos a chegada de vapor no purgador, o elemento termostático expande e bloqueia a passagem do vapor através do orifício de drenagem.

Figura 13 - Imagem interna de um purgador termostático.



Fonte: Disparco, 2021.

#### 4.2.2 Inspeção de purgadores

Purgadores são válvulas que realizam a drenagem do condensado e que retém apenas o vapor que é o necessário para o processo. Porém, os purgadores são dispositivos que podem vir a apresentar defeitos, diminuindo assim a vida útil do equipamento. Por isso, a inspeção é essencial, pois é um tipo de vistoria que tem como objetivo maximizar a eficiência da válvula, por isso faz-se necessário que ocorram análises constantes fazendo com que as operações estejam sempre seguras e com sua produtividade preservada. Sendo assim, existem alguns procedimentos que são realizados na inspeção (TLV, 2021).

Os purgadores podem ser inspecionados através da visualização, onde pode-se observar algumas anormalidades no funcionamento do equipamento, e é nesse procedimento que muitas vezes são identificados vazamentos através de furos, junta da conexão e vazamento por gaxetas. (Do Carmo Leite, 2013).

Os purgadores também podem ser inspecionados através do monitoramento de sua temperatura, nesse caso é utilizado um aparelho de termografia que tem por função aferir a temperatura do equipamento e das tubulações, o equipamento é mostrado na figura 14. Saberá se o purgador está funcionando corretamente através da temperatura local e da diferença da temperatura entre ele e a tubulação (Do Carmo Leite, 2013).

Figura 14 - Câmera termográfica para inspeção.



Fonte: Rio Link, 2021.

Além dessas, ainda tem a inspeção que é feita através do som, que conta com o auxílio do aparelho de ultrassonografia, como o exemplo mostrado na figura 15, é um procedimento em que averigua o som da passagem de vapor. Além de que, durante o transporte do condensado é produzido um som e uma vibração. Esse método averigua a sonoridade em que o vapor passa pelo purgador, mas para que consiga distinguir o som de um funcionamento padrão e um som com alterações, é fundamental obter a ajuda de um profissional experiente que usa equipamento especializado (TLV, 2021).

Figura 15 - Medidor de vazão ultrassônico modelo UE Systems UP-100.

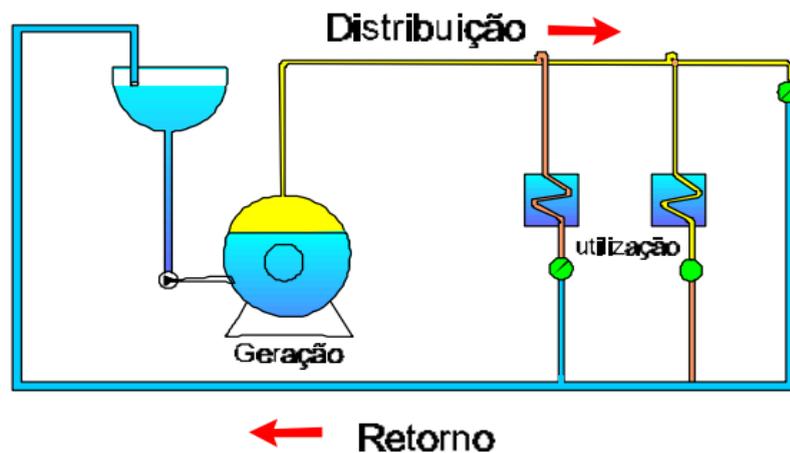


Fonte: Bartolotto, 2014.

## 5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR

Segundo a Spirax Sarco (1995), podemos entender o circuito básico de uma instalação de vapor em 4 macro-etapas, sendo elas: Geração do vapor, distribuição do vapor, utilização do vapor e retorno de condensado, conforme podemos visualizar na figura 16. Em cada etapa podemos identificar diferentes oportunidades de melhorias que visam maior eficiência energética do sistema.

Figura 16 – Esquema do circuito de um sistema de vapor.



Fonte: Spirax Sarco, 2021.

### 5.1 OPORTUNIDADES NA GERAÇÃO DE VAPOR

Na geração de vapor é possível economizar bastante energia, o combustível é um dos fatores mais importantes, pois sua relação de PCI (Poder calorífico inferior) e custo impacta diretamente no custo por tonelada de vapor gerado, e as perdas monetárias provenientes dos

vazamentos de vapor serão diretamente relacionadas a esses fatores, é interessante utilizar combustíveis com alto PCI e baixo custo de aquisição. Os combustíveis mais comuns utilizados na indústria são o óleo BPF, Gás natural, GLP e Cavaco de madeira (Spirax Sarco, 1995).

Outro fator importante é a temperatura da água de alimentação da caldeira, pois quanto maior for, menos energia será necessário para transformá-la em vapor. A utilização de boas práticas como o retorno de condensado, e equipamentos como economizadores, sistema de alimentação modulante e desaeradores contribuem muito positivamente para o aumento da temperatura da água de alimentação, pois são soluções que buscam utilizar outras fontes de energia como a alta temperatura contida nos gases de combustão ou no condensado, para pré-aquecer a água de alimentação, proporcionando economia considerável na quantidade de combustível utilizada (Eletrobrás, 2005).

Também podemos citar a importância do tratamento prévio da água de alimentação, com intuito de reduzir o número de descargas de fundo em função do tempo. Em uma explicação sucinta, a descarga de fundo é um sistema composto por válvulas que tem como objetivo eliminar determinadas impurezas existentes na água que, por serem mais pesadas, tendem a se acumular no fundo da caldeira. É recomendado que essa operação seja feita de forma automática para que se evite desperdício de água apta para geração de vapor e, além disso, com um bom tratamento da água de alimentação, menores quantidade de impurezas haverá no fundo da caldeira, conseqüentemente menos procedimentos de descargas serão necessários, proporcionando menor desperdício de energia, tendo em vista que a água eliminada possui a mesma temperatura e pressão do vapor gerado (Spirax Sarco, 1995).

## 5.2 OPORTUNIDADES NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

Na grande maioria das instalações de vapor, podem ocorrer picos de consumo e geração, provocando assim arraste de água na caldeira, levando um vapor úmido que será distribuído através das tubulações. O recomendado é que o vapor distribuído seja o mais seco possível, ou seja, que apresente título próximo a 1, para garantir maior eficiência (calor latente) na troca térmica. Além disso, as gotículas de água presentes no vapor, ao passar por válvulas, adquirem velocidades muito altas, chocando com os elementos internos das mesmas e diminuindo sua vida útil. Para garantir um vapor seco para distribuição e uso, é recomendado a instalação de equipamentos como coletores distribuidores de vapor e separadores de umidade, este último pode proporcionar um título de até 99% (Spirax Sarco, 1995).

Também recomenda-se um bom isolamento térmico nas tubulações e em todas as fontes potenciais de perda de calor. Em função dos custos de combustíveis, é recomendado que o isolamento tenha eficiência superior a 80%. Para se ter uma ideia, uma tubulação de 2", com 100m de comprimento, transportando vapor a 10 bar(g) de pressão e com temperatura ambiente de 15°C, caso não isolada, irá proporcionar um consumo adicional de 180kg/h de vapor, gerando maior consumo de combustível. Além disso, a formação excessiva de condensado proveniente do não isolamento também é um fator importante a ser considerado (Spirax Sarco, 1995).

Outro problema bastante comum nas tubulações de vapor são os pontos de vazamento, que são mais comuns nas conexões entre os componentes e tubulações, e também costumam aparecer nos purgadores defeituosos. O vazamento de vapor é, em outras palavras, um puro desperdício de energia e, conseqüentemente, monetário, e que deve ser evitado. É recomendado que sejam feitas inspeções e programas efetivos de manutenções nos purgadores e tubulações, a afim de se evitar tal desperdício (Eletrobrás, 2005).

### 5.3 OPORTUNIDADES NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR

Na distribuição de vapor é recomendado que o vapor esteja a uma alta pressão (Pressão de saída da caldeira), pois em pressões maiores o vapor saturado contém menor volume específico ( $V_g$ ) e assim é possível transportar mais massa de vapor. Na utilização é diferente, logo antes de utilizar o vapor em um equipamento, geralmente é recomendado uma redução de pressão, isso acontece pois vapor em pressões menores possuem maiores quantidades de calor latente ( $H_{fg}$ ), conforme mostra a tabela 6, que é justamente a energia que será utilizada para aquecer o processo no qual vai ser utilizado (Spirax Sarco, 1995).

Tabela 6 - Vapor saturado, relação entre pressão, volume específico e calor latente.

TEMPERATURA	PRESSÃO (RELATIVA)	VOLUME ESPECÍFICO		ENTALPIA ESPECÍFICA		
°C	kPaG	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		
T	P	V <sub>f</sub>	V <sub>g</sub>	H <sub>f</sub>	H <sub>fg</sub>	H <sub>g</sub>
100	0.093	0.0010435	1.672	419.1	2256	2676
110	42.051	0.0010516	1.209	461.4	2230	2691
120	97.340	0.0010603	0.8913	503.8	2202	2706
130	168.93	0.0010697	0.6681	546.4	2174	2720
140	260.18	0.0010798	0.5085	589.2	2144	2733
150	374.78	0.0010905	0.39250	632.3	2114	2746

Fonte: Adaptado de disparco, 2021.

Também se faz necessário uma verificação de todos os equipamentos quanto ao seu rendimento térmico. Problemas associados à falta de rendimento e produtividade podem estar relacionados com falta de manutenção e limpeza das superfícies de troca térmica, maldimensionamento dos purgadores instalados nos equipamentos e possível necessidade de um sistema de controle de temperatura. Por fim, pontos como bom isolamento térmico e manutenções programadas também são importantes para melhor eficiência dos equipamentos que utilizam vapor (Spirax Sarco, 1995).

#### 5.4 OPORTUNIDADES NO RETORNO CONDENSADO

Quando falamos em sistema de geração e distribuição de vapor, é de fundamental importância o conhecimento de que parte do vapor produzido acabará se condensando ao longo do sistema de distribuição. Esse condensado gerado é o resultado do processo de aquecimento onde o vapor passa uma quantidade da sua energia térmica conhecida como calor latente para o produto, linha ou equipamento que está sendo aquecido. O condensado nada mais é do que água tratada com uma temperatura elevada gerada ao longo do sistema, ou seja, ela carrega consigo um custo muito elevado, tanto em termos de energia quanto em termos de tratamento, por isso não deve ser descartada ou negligenciada (Cardoso, 2018).

Sendo assim, o retorno do condensado para o sistema é um procedimento que reutiliza a água e calor sensível, podendo possibilitar uma economia expressiva de energia e tratamentos, caracterizando-se como uma atitude economicamente viável, além de utilizar o potencial de utilização, reduzindo também a quantidade de calor que a caldeira deve gerar para transformá-lo novamente em vapor e a pegada de carbono da sua planta (Krieger, 2007).

Também é possível utilizar o vapor flash, que se forma a partir de água com redução de pressão. Acontece que em um sistema de retorno, o condensado é drenado pelo purgador a uma pressão consideravelmente alta, e geralmente armazenados em reservatórios à pressão atmosférica (tanques de alimentação) antes de ser reutilizado na caldeira. No momento em que a água em alta pressão passa para um sistema de menor pressão, parte do conteúdo

reevapora, e este vapor pode ser reutilizado em processos que exigem vapor de baixa pressão, proporcionando economia na geração de vapor e de combustível (Spirax Sarco, 1995).

A Spirax Sarco (1995) ainda explica que a fórmula de cálculo para determinar a porcentagem de vapor flash produzido a partir de uma determinada quantidade de condensado é a seguinte:

$$\% \text{ Reevaporação} = (2)$$

Onde: CSa é o calor sensível de alta pressão, CSb é o calor sensível de baixa pressão e CLb é o calor latente de baixa pressão.

## **6 METODOLOGIA**

O projeto tem como objetivo otimizar a eficiência energética da planta de vapor em estudo e, para isso, devemos levar em consideração pontos que tenham uma relação direta com a economia de combustível e com o fornecimento de um vapor com maior título. Sendo assim, os seguintes pontos abaixo foram avaliados:

- Funcionamento de todos os purgadores da fábrica;
- Verificação da qualidade do vapor;
- Verificação da quantidade de pontos de drenagem ao longo da linha de distribuição;
- Verificação da pressão de vapor utilizada nos equipamentos.

O trabalho pode ser explicado em 4 grandes etapas, que vão desde a pesquisa bibliográfica até a análise de soluções e resultados esperados, conforme segue abaixo uma explicação mais detalhada.

### **a) Etapa 1: Pesquisa bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica presente neste trabalho teve como objetivo identificar as principais variáveis e considerações que influenciam diretamente no resultado do projeto e, sendo assim, buscou-se compreendê-las, para que todo o procedimento posterior fosse realizado com o devido embasamento científico.

### **b) Etapa 2: Visita e avaliação da instalação de vapor**

Durante a visita, os purgadores foram inspecionados e foram levantados dados referentes aos seus respectivos modelos, quantidades e locais de instalação. Também foi verificado todos os dados relacionados à geração de vapor, como o modelo da caldeira, capacidade de produção, custo do combustível e pressão do vapor gerado. Por fim, a qualidade do vapor também foi analisada, assim como a pressão de utilização do vapor nos equipamentos, esses pontos serão expostos neste trabalho com objetivo de especificar soluções adequadas que proporcionem maior eficiência energética para o sistema.

### **c) Etapa 3: Análise de dados**

Com os dados coletados, foi possível interpretá-los e ter uma visão macro dos principais problemas da planta, assim como quantificar ou identificar fatores importantes como o custo do vapor gerado, os resultados referente à inspeção de purgadores e a quantidade de desperdício de vapor através dos purgadores danificados, além de perdas de energia em procedimentos ineficientes e as necessidades gerais de adequações em diferentes pontos da instalação.

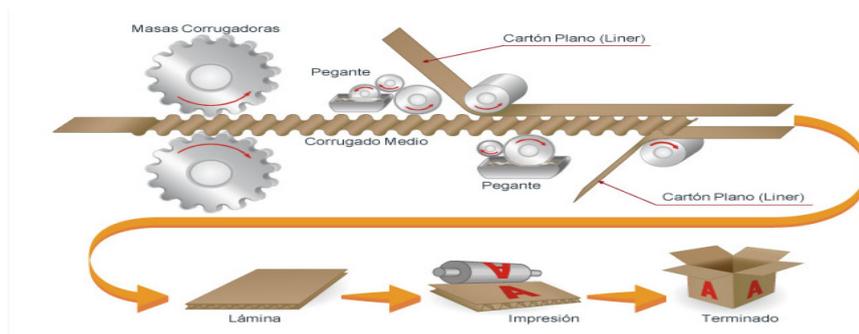
### **d) Etapa 4: Análise de soluções e resultados esperados**

Por fim, com os potenciais pontos de economia de energia levantados, assim como seus custos atuais referentes ao desperdício energético e monetário, serão especificadas soluções apropriadas, levando em consideração o retorno do investimento em meses para o projeto proposto, além das melhorias qualitativas que serão proporcionadas ao sistema produtivo da fábrica.

## **6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

A fábrica avaliada é localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco, e possui uma linha de produção que conta com a fabricação de papelão corrugado que, após produzido, é recortado e utilizado para fabricação de caixas e embalagens em geral. Iremos analisar especificamente o processo inicial do sistema produtivo da fábrica, que é justamente o processo da produção do papelão corrugado, onde necessita de vapor para acontecer, conforme ilustrado na figura 17.

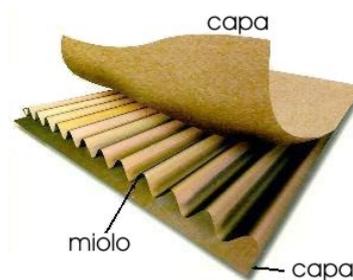
Figura 17 - Processo de produção de caixas de papelão corrugado.



Fonte: Print Job Mexico, 2021.

A primeira etapa da produção ocorre em uma máquina chamada corrugador, onde é composta por rolos sulcados que imprimem uma camada de papel promovendo formato ondulado, esses rolos utilizam vapor quente para facilitar a deformação do material. O papel ondulado produzido irá compor a camada do meio do papelão corrugado que a fábrica deseja produzir, conhecida como miolo, conforme podemos ver na figura 18.

Figura 18 - Composição do papelão corrugado.



Fonte: Incapacaixas, 2021.

Seguindo a linha de produção, a camada ondulada recebe aplicação de cola em suas superfícies através de outros rolos responsáveis por tal tarefa. Por fim, os rolos posteriores do processo são responsáveis por unir essa camada com outras duas camadas planas de papel, criando assim o papelão corrugado.

A segunda etapa acontece logo após da recente produção do papelão corrugado, nesse ponto é necessário que o produto seja direcionado para a mesa plana, que é um local aquecido com vapor para promover retirada de umidade do material e secagem da cola recém aplicada. Por fim, após esse processo o papelão está pronto para seguir para a etapa de corte e armazenamento.

## 6.2 DADOS OPERACIONAIS

Inicialmente iremos expor todas as informações coletadas nas diversas etapas da instalação de vapor, coletamos apenas as informações suficientes para que fosse possível desenvolver soluções personalizadas e direcionadas para os pontos de maior necessidade.

Vale ressaltar que, grande parte dos dados foram coletados através de informações recebidas diretamente dos gestores da planta, além de outras fontes como medições de variáveis feitas nos equipamentos e leitura de plaquetas.

### 6.2.1 Informações da caldeira

A caldeira da fábrica se trata de uma caldeira do tipo flamotubular, modelo M3P-4.0, do fabricante ALLBORG Industries, como podemos visualizar nas figuras 19 e 20, que foram fotos tiradas durante a visita. A caldeira é relativamente nova e está em excelente estado de operação, foi adquirida em 2018 e possui todos os equipamentos adequados para seu funcionamento, como válvulas de segurança, descarga de fundo automática e manômetro.

Figura 19 - Caldeira da fábrica em estudo.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 20 – Plaqueta da caldeira da fábrica em estudo.



Fonte: Autor, 2021.

Consultando o catálogo do fabricante, é possível identificar algumas informações relevantes da caldeira, como eficiência, consumo de combustível, capacidade com água de alimentação a uma determinada temperatura, peso e dimensões, conforme mostra a tabela 7. As informações contidas na plaqueta e no catálogo são fundamentais para que possamos calcular o custo do vapor gerado, e assim viabilizar os cálculos referentes à eficiência energética e retorno do investimento.

Tabela 7 - Informações das caldeiras da série M3P

Modelo	Capacidade com água de alimentação a 20°C (Ton/h)	Eficiência (%) <sup>*</sup>	Consumo Óleo 1A (Kg/h)	Consumo Gás Natural (Nm³/h)	Consumo GLP (Kg/h)	Consumo Diesel (Kg/h)	Dimensões (mm)				Peso (ton)	
							C	L	A	Chaminé	Vazia	Oper
M3P-2.0	2	90±2%	152	158	130	144	5,655	2,540	2,523	340	9.0	13.8
M3P-2.5	2,5	90±2%	189	197	162	179	5,847	2,660	2,629	340	9.5	15.3
M3P-3.2	3,2	90±2%	241	252	207	228	6,044	2,860	2,834	340	10.5	17.3
M3P-4.0	4	90±2%	300	314	258	285	6,412	2,920	3,099	500	12.5	20.7
M3P-5.0	5	90±2%	378	395	325	358	6,962	2,970	3,052	500	14.5	24.3
M3P-6.5	6,5	90±2%	491	512	421	466	7,130	3,260	3,380	500	16.5	28.2
M3P-8.0	8	90±2%	606	632	520	575	7,389	3,340	3,430	600	21.0	35.3
M3P-10	10	90±2%	755	789	648	716	7,594	3,510	3,645	600	26.0	46.2
M3P-12	12	90±2%	905	944	776	857	8,052	3,850	3,865	600	31.0	52.4
M3P-15	15	90±2%	1126	1175	967	1066	8,780	4,390	4,010	750	33.6	60.3
M3P-17	17	90±2%	1270	1326	1090	1202	9,350	4,370	4,290	750	42.0	74.7
M3P-20 IF	20	90±2%	1492	1558	1281	1412	9,500	4,600	4,500	1,160	45.8	82.2
M3P-20	20	90±2%	1501	1567	1288	1421	8,090	5,580	4,610	1,160	50.0	88.1
M3P-24	24	90±2%	1801	1880	1546	1706	8,400	5,780	4,820	1,160	53.0	96.4

Fonte: ALLBORG, 2021.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 CUSTO DO VAPOR

O Custo do vapor vai nos informar, em reais, o quanto custa para produzir 1 (uma) tonelada de vapor, considerando os dados operacionais como pressão do vapor gerado, PCI (Poder calorífico inferior) do combustível, custo do combustível, eficiência da caldeira, custo da água tratada e temperatura da água de alimentação. O cálculo pode ser feito a partir da equação abaixo, onde vale ressaltar que, de maneira conservadora, não é considerado o custo da aquisição da água tratada.

$$\text{Custo do vapor} = (3)$$

Onde,

hg: Entalpia do vapor saturado na pressão de geração (kJ/kg)

hf: Entalpia da água de alimentação (kJ/kg)

PCI: Poder calorífico inferior do combustível (kJ/Kg)

$\mu$ : Eficiência da caldeira

CB: Custo do combustível (R\$/kg)

Durante a visita foi possível verificar que a pressão relativa de geração de vapor é de aproximadamente 11 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme podemos verificar na figura 21, onde é possível visualizar a indicação do manômetro que mede a pressão interna da caldeira.

Figura21 - Manômetro indicando pressão do interior da caldeira.



Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Bermo, a uma pressão absoluta de 12 kgf/cm<sup>2</sup>, que é equivalente ao considerar uma pressão relativa de 11kgf/cm<sup>2</sup>, o vapor possui uma temperatura de 187,96°C, também podemos consultar na tabela 8 outras informações relevantes para o custo do vapor, como a entalpia do vapor saturado, que é 2782,7 kJ/kg.

Tabela 8 - Tabela para vapor d'água em estado de saturação

Fonte: Bermo, 2021.

Tabela para Vapor d'água em Estado de Saturação						
Pressão Absoluta kgf/cm <sup>2</sup>	Temperatura de vaporização C°	Volume específico do vapor saturado m <sup>3</sup> /kg	Peso do vapor saturado kg/m <sup>3</sup>	Entalpia específica		Calor latente de evaporação kJ/kg
				do líquido saturado kJ/kg	do vapor saturado kJ/kg	
2.0	120,23	0.8854	1,129	504,70	2706,3	2201,6
2.5	127,43	0.7184	1,392	535,34	2716,4	2181,0
3,0	133,54	0.6056	1.651	561,43	2724,7	2163,2
3.5	138,87	0,5240	1,908	584,27	2731,6	2147,4
4,0	143,62	0,4622	2.163	604,67	2737,6	2133,0
4,5	147,92	0.4138	2,417	623,16	2742,9	2119,7
5,0	151,84	0,3747	2,669	640,12	2747,5	2107,4
5,5	155,46	0,3426	2,920	655,78	2751,7	2095,9
6,0	158,84	0,3155	3,170	670,42	2755,5	2085,0
6,5	161,99	0,2925	3,419	684,12	2758,8	2074,0
7,0	164,96	0,2727	3,667	697,06	2762,0	2064,9
7,5	167,75	0,2554	3,915	709,29	2764,8	2055,5
8,0	170,41	0,2403	4,162	720,94	2767,5	2046,5
8,5	172,94	0,2268	4,409	732,02	2769,9	2037,9
9,0	175,36	0,2148	4,655	742,64	2772,1	2029,5
9,5	177,66	0,2040	4,901	752,81	2774,2	2021,4
10,0	179,88	0,1943	5,147	762,61	2776,2	2013,6
11	184,07	0,1747	5,637	781,13	2779,7	1998,5
12	187,96	0,1632	6,127	798,43	2782,7	1984,3
13	191,61	0,1511	6,617	814,70	2785,4	1970,7
14	195,04	0,1407	7,106	830,08	2787,8	1957,7
15	198,29	0,1317	7,596	844,67	2789,9	1945,2
16	201,37	0,1237	8,085	858,56	2791,7	1933,2

Além dos dados referentes à pressão do vapor, também se faz necessário consultar o poder calorífico inferior do combustível, que é uma variável extremamente importante para o cálculo. Durante a visita, foi possível verificar que o combustível utilizado na caldeira se trata do gás natural.

Segundo a Gás Brasileiro, o poder calorífico inferior do Gás Natural a 20°C é de 8.364Kcal/m<sup>3</sup>, e sua massa específica equivale à 0,76 kg/m<sup>3</sup>, sendo assim, em unidades convencionais para o nosso cálculo, podemos considerar o poder calorífico inferior como 11.005,26 kcal/kg ou 46.076,82 kJ/kg.

Durante a visita também verificamos que a temperatura da água de alimentação da caldeira é de aproximadamente 80°C. Segundo Cengel (2006), o calor específico da água é de 4.18 kJ/kg°C, multiplicando esse valor pela temperatura encontrada, podemos encontrar o calor específico total da água de alimentação da caldeira (hf), conforme podemos visualizar abaixo:

$$hf = 80^{\circ}\text{C} \times 4,18 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$hf = 335,12 \text{ kJ/kg}$$

Por fim, na tabela 9 podemos visualizar os principais dados compilados e resumidos, para que seja possível entendermos os dados de operação de maneira mais prática e prosseguirmos com o cálculo do custo do vapor. Vale ressaltar que os dados que não foram especificados ou referenciados, foram coletados através de informações enviadas diretamente pelos gestores da planta.

Tabela 9 - Resumo dos dados operacionais.

<b>Combustível</b>	<b>Gás Natural</b>
<b>Custo do combustível</b>	R\$5,22/kg
<b>Pressão de operação</b>	11kgf/cm <sup>2</sup>
<b>Temperatura do vapor</b>	187,96 °C
<b>Eficiência da caldeira</b>	90%
<b>Temperatura de alimentação</b>	80,0°C
<b>Custo da água</b>	R\$4,00/ton
<b>Poder calorífico inferior (PCI)</b>	46.076,82kJ/kg
<b>Entalpia da água de alimentação à 80°C (h)</b>	335,12kJ/kg
<b>Entalpia de Evaporação 11 kgf/cm<sup>2</sup> (hfg)</b>	1984,3kJ/kg
<b>Entalpia do vapor 11 kgf/cm<sup>2</sup> (hf)</b>	2782,7 kJ/kg

Fonte: Autor, 2021.

Com os dados acima expostos, podemos substituir as variáveis da equação 3e obter o custo do vapor gerado em R\$/tonelada.

Custo do vapor (Cv) =

$$\text{Custo do vapor (Cv)} = \text{R\$308,09/ton}$$

## 7.2 OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS

Inicialmente iremos expor todas as informações coletadas nas diversas etapas da instalação de vapor, coletamos as informações suficientes para que fosse possível desenvolver soluções personalizadas e direcionadas para os pontos de maiores necessidades.

Vale ressaltar que grande parte das informações foram coletadas através de informações recebidas diretamente dos gestores da planta, além de outras fontes como medições de variáveis feitas nos equipamentos e leitura de plaquetas.

### 7.2.1 Inspeção nos purgadores de vapor

Em nosso estudo foram avaliados um total de 28 purgadores, o procedimento de inspeção foi feito utilizando monitoramento termográfico e ultrassônico, proporcionando assim um resultado mais assertivo. Dos 28 purgadores analisados, 22 são do tipo termodinâmico, sendo os outros 6 do tipo mecânico de bóia.

Os resultados da inspeção é computada em um software, o mesmo calcula a quantidade de vapor desperdiçada em situações de purgadores com vazamento, a partir dos seus dados operacionais. O software também organiza graficamente os resultados da inspeção e categoriza os purgadores nos tipos de diagnósticos mostrados na tabela 10.

Tabela 10 - Tipos de diagnóstico na inspeção.

Diagnóstico	Significado
OK	O purgador se encontra nas condições normais de funcionamento

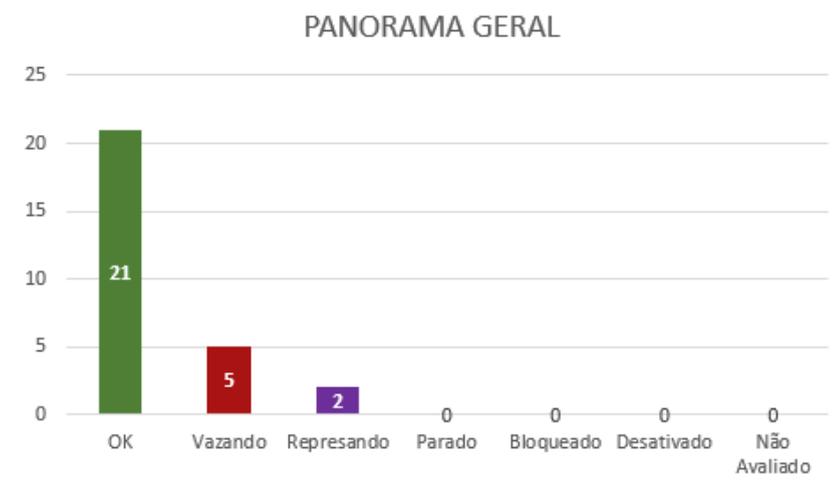
Vazando	Além de permitir a passagem de condensado, o purgador também está permitindo a passagem de vapor.
Represando	O purgador não drena o condensado que se forma.
Parado	O equipamento ou linha do purgador instalado não está em operação
Bloqueado	A válvula à montante do purgador está fechada
Desativado	Apesar do purgador está instalado, a linha não é mais utilizada
Não avaliado	Ponto não foi avaliado devido à alguma dificuldade encontrada no local (Ex.: Acesso inseguro)

Fonte: Autor, 2021.

O resultado da avaliação constatou vazamento em 5 purgadores. Vale ressaltar que o vazamento de vapor vivo através dos purgadores é uma perda direta na eficiência energética do sistema e, conseqüentemente, gera-se um desperdício monetário, isso por que o vapor tem um custo para ser gerado, o qual já foi calculado, e vazamentos consideráveis podem proporcionar grandes perdas no longo prazo.

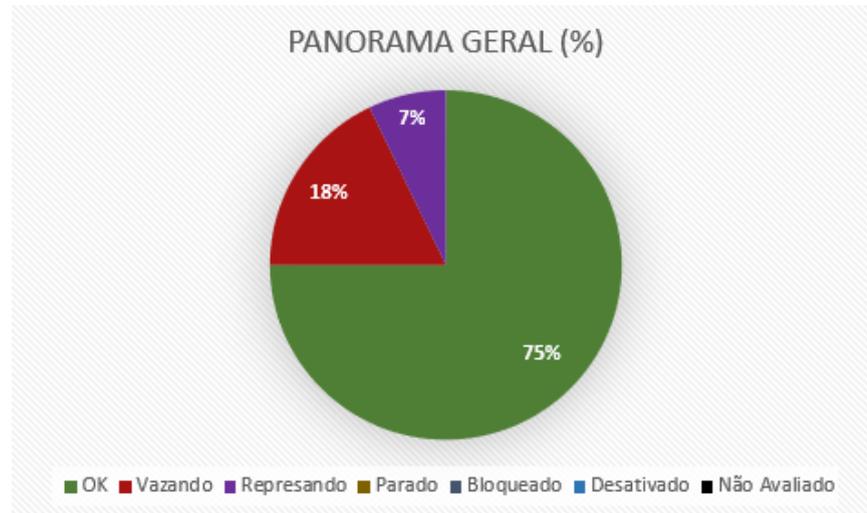
Além dos purgadores vazando, foi identificado também 2 purgadores com represamento, como já explicado, são purgadores que falharam fechado e estão impossibilitando a passagem de condensado, acumulando-o nas tubulações e equipamentos. Abaixo temos um resumo gráfico da inspeção feita na fábrica, composto pelas figuras 22 e 23, além da tabela 11.

Figura 22- Resumo dos resultados da inspeção.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 23 - Resumo da inspeção em porcentagem.



Fonte: Autor, 2021.

Tabela 11 - Condição por tipo de purgador.

CLASSIFICAÇÃO	OK	Vazando	Repesando	Parado	Bloqueado	Desativado	(Não avaliado)	TOTAL		Perda horária (kg vapor / h)	Perda mensal (ton vap. / mês)
<b>Termodinâmico</b>	18	2	2	0	0	0	0	22	79%	12,50	8,70
<b>Mecânico de bóia</b>	3	3	0	0	0	0	0	6	21%	9,96	6,94
	21	5	2	0	0	0	0	28		22,46	15,64
	75%	18%	7%	0%	0%	0%	0%				

Fonte: Autor, 2021.

Como podemos ver, a perda horária total constatada foi de 22,46 kg/h, através de vazamentos verificados em 5 purgadores, sendo 3 mecânicos de boia e 2 termodinâmicos. No regime de operação da fábrica, que é de 20h/dia e 26 dias/mês, temos um total de 11.679,2 kg de vapor desperdiçado. Sabendo que o custo para gerar uma tonelada de vapor é de R\$308,09/ton, temos que:

$$\text{\$Vazamento} == \text{R}\$3.598,24/\text{mês}$$

### 7.2.2 Recomendações referentes à inspeção de purgadores

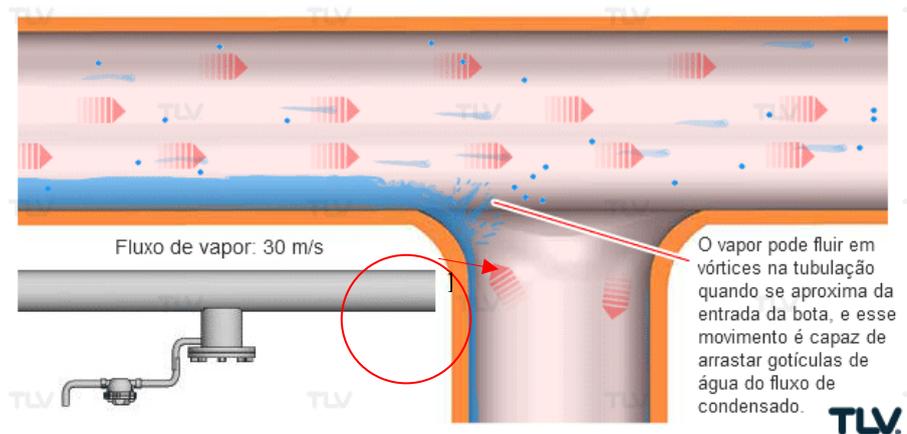
Como exposto acima, um desperdício de 11.679,2kg/mês ou R\$3.598,24/mês é bastante expressivo e impacta diretamente na eficiência energética do sistema, principalmente a longo prazo. A recomendação tratada para este ponto é a troca dos 7 purgadores que estão

danificados, corrigindo os problemas relacionados à vazamento de vapor e represamento de condensado, proporcionando um retorno de investimento equivalente ao desperdício mensal calculado.

### 7.2.3 Qualificação do vapor após a saída da caldeira

Durante o trabalho em campo nos deparamos com queixas do gestor da planta relacionadas à umidade do vapor e desgaste interno de válvulas e equipamentos da linha de distribuição. Vale ressaltar que em um período recente de alguns meses a planta está sob produção de alta demanda, provocando muitas vezes picos de consumo de vapor, que impacta diretamente na sua geração, provocando o arraste da água da caldeira e, assim, distribuindo um vapor mais úmido. Além disso, o arraste de partículas de água pode ocorrer em pontos baixos, botas coletoras de condensado e curvas de tubulação, ou seja, em qualquer região onde se tenha determinada quantidade de condensado formado e fluxo de vapor a alta velocidade, como podemos observar na figura 24.

Figura 24 - Arraste de condensado em uma bota coletora

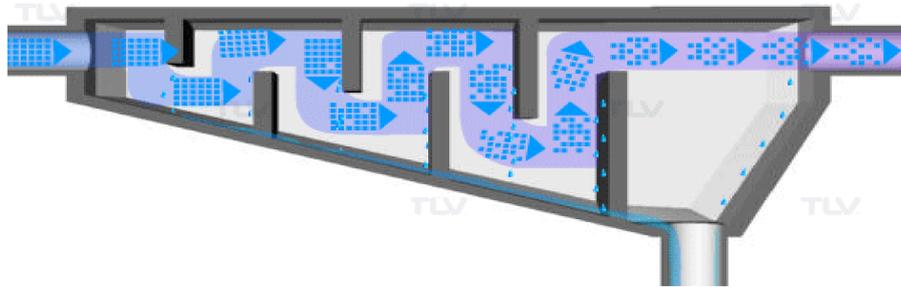


Fonte: Adaptado de TLV, 2021.

Sendo assim, o sistema de drenagem composto por purgadores não é suficiente para retirar todo o condensado do vapor, isso porque parte do condensado está em forma de gotículas que são arrastadas junto ao fluxo do vapor, sem que haja uma separação direta por densidade entre os dois estados físicos. Sabemos que quanto mais seco o vapor, melhor para o sistema em diferentes aspectos, desde a vida útil dos equipamentos, quanto na eficiência da troca térmica.

### 7.2.3.1 Recomendações referentes à qualificação do vapor

Figura 25 - Mecanismo de separação de umidade.



Fonte: TLV, 2021.

De acordo com o que foi exposto, foi recomendada, neste trabalho, a instalação de um separador de umidade imediatamente após a caldeira, ou seja, no início de linha de distribuição. O modelo indicado é um separador de umidade horizontal e, conforme podemos ver na imagem 25, seu mecanismo de separação é através de aletas centrais que obrigam a mudança de direção do fluxo de vapor e, durante esse processo, as gotículas de águas são separadas ao se chocarem com essas aletas e escoam na parte inferior do equipamento, que são retiradas através de um purgador instalado abaixo do separador. Após esse processo, é possível obter um título de até 99% a jusante do separador. Na figura 26 é possível visualizar o ponto recomendado para instalação do separador.

Figura 26 - Ponto recomendado para instalação do separador.



Fonte: Autor, 2021.

Em suma, não é possível estimarmos uma economia através da melhoria da qualidade do vapor, pois não temos informações precisas da qualidade do vapor atual da planta. Sendo

assim, o retorno do investimento se trata de melhorias qualitativas, principalmente relacionadas ao aumento da vida útil das válvulas e equipamentos, além da maior eficiência na troca térmica feita através de um vapor seco, aproveitando seu calor latente em praticamente sua totalidade.

### 7.2.3.2 Pontos de drenagem

Ao inspecionar a linha de distribuição da fábrica, identificamos que a mesma possui aproximadamente 90 metros de extensão, como podemos ver na figura 27. O ponto crítico identificado foi que não existia nenhum ponto de drenagem de condensado ao longo da linha, em outras palavras, o condensado formado durante a distribuição do vapor é arrastado diretamente para os equipamentos de troca térmica, o que justifica boa parte dos problemas relatados pelos gestores da planta relacionados à eficiência de produção e baixa temperatura em alguns pontos.

Figura 27 - Linha de distribuição.



Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a tabela 4, para uma tubulação de 4" com vapor à 11 kgf/cm<sup>2</sup>, temos aproximadamente uma formação de 11kg/h de condensado a cada 30m, o que totaliza a formação de aproximadamente 33 kg/h de condensado ao longo de toda a linha, que precisa ser expulso do sistema antes de alcançar os equipamentos.

Além da falta de pontos de drenagem ao longo da linha de distribuição, identificamos também uma não adequação na extremidade final da linha, onde a drenagem, que é feita de maneira manual, através de uma válvula do tipo esfera e sem a utilização de purgadores, como podemos ver na figura 28. Vale ressaltar que o ponto de drenagem em final de linha deve

conter dois tipos de purgadores, termostático e termodinâmico, que são destinados à remoção de ar e condensado, respectivamente.

Figura 28 - Ponto de drenagem inadequado no final da linha.

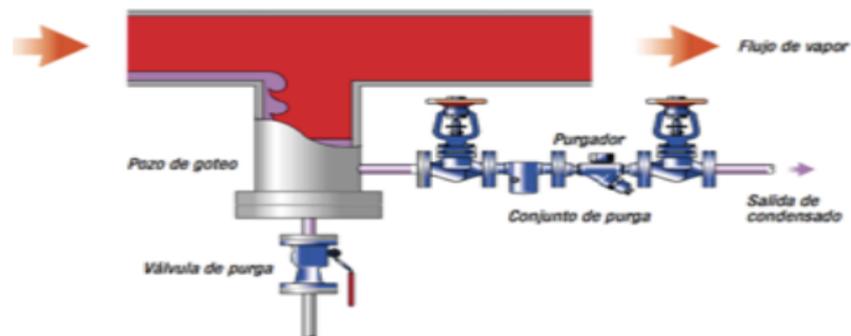


Fonte: Autor, 2021.

### 7.2.3.3 Recomendações para drenagem de condensado

Seguindo as boas práticas para sistemas de vapor, recomendamos a instalação de 03 novos pontos de drenagem na linha de distribuição, incluindo a adequação do ponto de drenagem do final da linha.

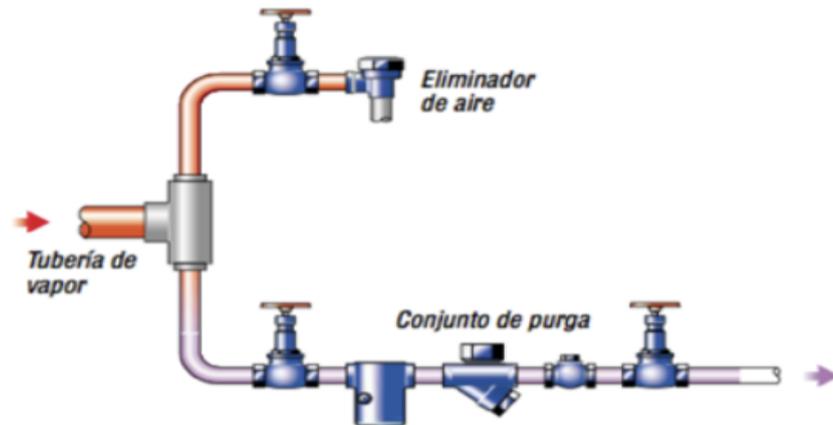
Figura 29 - Bota coletora para drenagem ao longo da linha.



Fonte: Vapor para la indústria, 2021.

Os pontos de drenagem ao longo da linha de distribuição devem seguir o princípio de instalação da figura 29, o condensado é acumulado em uma região baixa, onde pode ser drenado através da válvula manual que se encontra na região inferior da bota, em situações onde o purgador não esteja funcionando corretamente. Em situações normais, o condensado é drenado através do conjunto de purga, que é composto por um purgador termodinâmico, válvulas de bloqueio à jusante e à montante do purgador, visor de fluxo e filtro tipo Y, este último é instalado imediatamente antes do purgador, para garantir que o vapor e condensado chegue limpo ao mecanismo de purga.

Figura 30 - Ponto de drenagem no final da linha.



Fonte: Vapor para la indústria, 2021.

A drenagem de final de linha deve seguir conforme a figura 30, é de fundamental importância que o sistema conte com um eliminador de ar na região superior e um purgador para o condensado na região inferior. O eliminador de ar atua expulsando o ar que se acumula nas tubulações de vapor e que interferem diretamente na eficiência de troca térmica do sistema.

Quando a fábrica para suas operações, o vapor contido nas tubulações se condensa e, conseqüentemente seu volume diminui consideravelmente, esse processo cria um vácuo por conta do espaço ocupado anteriormente pelo vapor, proporcionando a entrada de ar no sistema através das regiões de conexões entre os equipamentos e tubulações. Posteriormente, quando a fábrica entrar em operação novamente, o ar acumulado será empurrado para o final da linha pelo vapor gerado, nesse momento percebe-se a importância do eliminador de ar no ponto mencionado, tendo um papel fundamental para o funcionamento adequado do sistema, garantindo apenas a presença do vapor no interior das tubulações.

Por fim, conforme recomendação que consta na figura 8, consideraremos um conjunto de purga com equipamentos de 1/2" e válvula de dreno de 1", a bota coletora deve ter diâmetro de 3", com comprimento mínimo de 250 milímetros.

#### 7.2.4 Redução de pressão

O vapor é utilizado na fábrica sem nenhuma redução de pressão, ou seja, é gerado a 11 kgf/cm<sup>2</sup> e distribuído diretamente para os equipamentos. A fábrica possui basicamente duas etapas de consumo de vapor, sendo a primeira para o aquecimento dos cilindros secadores e a segunda para o aquecimento da mesa plana.

A primeira etapa é realizada através de vários cilindros secadores que são aquecidos com vapor, com objetivo de unir três ou mais camadas de papéis para formar o papelão corrugado, esse processo necessita de mais demanda de vapor, a uma pressão mais alta. Por outro lado, a segunda etapa é a mesa plana, mostrada na figura 31, como podemos ver na imagem abaixo, essa etapa consome menos vapor e não necessita de vapor a alta pressão, tendo em vista que o processo é destinado apenas para o secagem da cola e retirada da umidade do papelão recém fabricado, e também realiza o encaminhamento para o processo de corte e armazenamento.

Figura 31 - Mesa da máquina de fabricação de papelão corrugado.



Fonte: Autor, 2021.

Durante a avaliação do caso, foi possível contatar o fabricante da máquina para validar a menor pressão possível do vapor a ser utilizado em cada etapa, visando maior eficiência energética do sistema, tendo em vista que vapor à menor pressão possui maior calor latente por unidade de massa. Como retorno, foi constatado que na primeira etapa seria possível utilizar vapor à  $8\text{kgf/cm}^2$ , já na segunda etapa a pressão poderia ser utilizada em até  $4\text{kgf/cm}^2$ , sem que houvesse nenhum comprometimento do produto ou dano ao sistema.

Através da tabela 8, podemos verificar a diferença de calor latente para vapor à  $11\text{kgf/cm}^2$ ,  $8\text{kgf/cm}^2$  e  $4\text{kgf/cm}^2$ . Para facilitar a comparação, os dados de interesse foram inseridos na tabela 12.

Tabela 12 - Comparação do calor latente nas pressões avaliadas (Autor)

<b>Pressão relativa (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Calor latente de evaporação (kJ/kg)</b>
11 kgf/cm <sup>2</sup>	1984,3 kJ/kg
8 kgf/cm <sup>2</sup>	2029,5 kJ/kg
4 kgf/cm <sup>2</sup>	2107,4 kJ/kg

Fonte: Autor, 2021.

Comparando diretamente a quantidade de energia entre as diferentes pressões de utilização de vapor, é possível obter redução na quantidade de vapor em massa nas duas situações, onde a pressão pode ser reduzida para 8kgf/cm<sup>2</sup> na etapa 1, e para 4kgf/cm<sup>2</sup> na etapa 2, adotando que atualmente ambos os processos trabalham à 11kgf/cm<sup>2</sup>. Sendo assim, temos que:

A demanda de vapor é dividida para as duas etapas aproximadamente na proporção de 1 para 3, isto é, aproximadamente 60% do vapor gerado é destinado à etapa 1, enquanto que 40% do vapor gerado é destinado à etapa 2. Tomando uma postura conservadora, adotaremos uma capacidade produtiva de 3.000kg/h sob condições normais de operação, tendo em vista que a caldeira tem uma capacidade máxima de 4.000kg/h. Com essas considerações, temos que aproximadamente 1.800kg/h de vapor é destinado à etapa 1 e 1200kg/h de vapor é destinado à etapa 2, assim é possível calcular a redução do consumo de vapor em massa, conforme segue abaixo:

Logo, temos uma economia total de 146,4 kg/h de vapor gerado na caldeira. Por fim, considerando o regime de operação da fábrica e o custo da geração de uma tonelada de vapor, temos como calcular a possível economia mensal em massa e monetária:

$$\text{Economia (kg)} = = 76.128\text{kg/mês}$$

Logo, temos que:

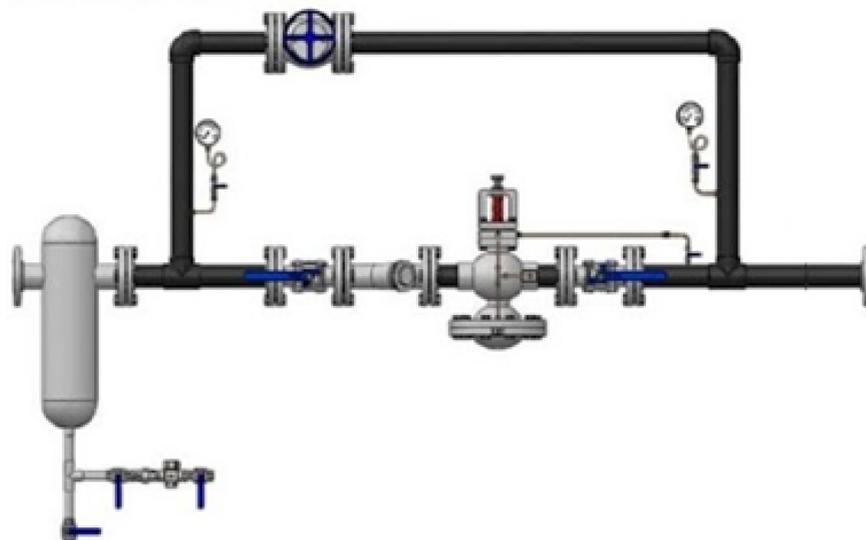
$$\text{Economia (R\$)} = = \text{R\$}23.454,27/\text{mês}$$

### 7.2.5 Recomendações referentes à redução de pressão

Como podemos ver nos cálculos acima, a redução de pressão se faz necessária para otimizar a eficiência energética do sistema, e pode ser realizada através de duas estações redutoras de pressão, uma para cada etapa de utilização do vapor, tendo em vista que trabalharão em pressões diferentes.

Uma estação redutora de pressão é tipicamente composta por uma válvula redutora de pressão auto-operada e seus devidos acessórios necessários para um funcionamento adequado do sistema. Em nossa recomendação, a estação redutora irá contar com manômetros à montante e a jusante, onde serão utilizados para verificar se a pressão realmente está sendo reduzida. Além disso, a estação irá possuir válvulas para by-pass e válvulas de bloqueio à montante e à jusante da válvula redutora, com objetivo de facilitar manutenções futuras de forma segura e prática. Por fim, também será indicado a instalação de um separador de umidade com kit drenagem à montante da estação, conforme podemos ver na figura 32.

Figura 32 - Ilustração de uma estação redutora de pressão auto-operada.



Fonte: Casa da caldeira, 2021.

## 8 ESPECIFICAÇÃO E INVESTIMENTOS

Após o levantamento de todas as soluções, foi especificado todos os itens necessários para atender cada etapa recomendada, com objetivo de listar os itens necessários e seus respectivos investimentos para aquisição.

Vale ressaltar que os valores informados de cada item foram obtidos através de solicitação de cotação para o principal fornecedor da fábrica, além disso, as soluções foram cotadas desmontadas, com objetivo de economizar, tendo em vista que a fábrica possui mão de obra e capacidade técnica para montagem.

### 8.1 ESPECIFICAÇÃO DOS PURGADORES DANIFICADOS

Os purgadores que apresentaram defeitos foram do tipo termodinâmicos e mecânico de bóia e, levando em consideração o estado de conservação que estavam os purgadores danificados, foi recomendado a troca de todos eles, ao invés da realização de reparos.

O modelo recomendado para o termodinâmico é o de fluxo distribuído, fabricado em aço inoxidável, composto por isotampa, corpo e disco, no diâmetro de 1/2" e com rosca do tipo NPT (National Pipe Thread). Por fim, o modelo tipo boia recomendado deve ser fabricado em ferro fundido e conter sistema de eliminação de ar integrado, no diâmetro de 1/2" e com rosca do tipo NPT. A tabela 13 mostra o resumo dos investimentos relacionados a este ponto.

Item	Quantidade	Investimento
Purgador termodinâmico 1/2" com rosca NPT	4	R\$1.963,76
Purgador mecânico de bóia	3	R\$3.422,91

1/2" com eliminador de ar e rosca NPT		
	<b>Total:</b>	<b>R\$5.386,67</b>

Tabela 13 - Investimento para aquisição de novos purgadores.

Fonte: Autor, 2021.

## 8.2 ESPECIFICAÇÃO DO SEPARADOR DE UMIDADE

O separador de umidade será do tipo horizontal, por ser o tipo mais comum para diâmetros a partir de 2", irá possuir conexões flangeadas em norma ANSI B16.47 150#, onde possui resistência suficiente para suportar a pressão do vapor gerado na caldeira. O material do corpo será em ferro fundido e seu diâmetro será igual ao da tubulação de saída da caldeira, que é de 4". O valor para aquisição segue especificado na tabela 14.

Tabela 14 - Investimento para aquisição do separador de umidade.

<b>Item</b>	<b>Investimento</b>
Separador de umidade horizontal 4" 150#	R\$5.440,71

Fonte: Autor, 2021.

## 8.3 ESPECIFICAÇÃO DAS BOTAS COLETORAS E DRENAGEM PARA FINAL DE LINHA

As botas coletoras para drenagem de condensado na linha de distribuição irão contar com um purgador termodinâmico de fluxo, distribuído fabricado em aço inox, um filtro Y

fabricado em ferro fundido e três válvulas tipo esfera fabricada em aço carbono, todos os itens serão de 1/2" com conexão roscada do tipo NPT.

Por fim, o ponto de drenagem para final de linha necessitará dos mesmos itens acima, porém também incluindo mais uma válvula do tipo esfera e também um purgador termostático eliminador de ar, todos com diâmetro de 1/2" e conexão do tipo rosca NPT. A tabela 15 nos mostra o valor necessário para investimento e adequação dos pontos de drenagem.

Tabela 15 - Investimento para aquisição de equipamentos para pontos de drenagem.

Item	Qtd	Investimento
Bota coletora para drenagem ao longo da linha de distribuição (1/2")	2	R\$1982,90
Ponto de drenagem de final de linha (1/2")	1	R\$2.068,04
<b>Total:</b>		<b>R\$4.050,94</b>

Fonte: Autor, 2021.

### 8.3.1 Estação redutora para etapa 1

Essa estação será responsável por reduzir a pressão de 11kgf/cm<sup>2</sup> para 8kgf/cm<sup>2</sup>. A vazão considerada para dimensionamento da estação foi a máxima possível, isto é, em situações onde a caldeira atingir sua capacidade máxima de produção de 4ton/h e, sob essas condições, a etapa 1 receberá aproximadamente 2.400kg/h.

Pela relação de vazão, área e velocidade, é possível especificar o diâmetro necessário para suportar a vazão desejada com uma velocidade do vapor de até 35m/s, nas pressões de 11kgf/cm<sup>2</sup> e 8kgf/cm<sup>2</sup>, ou seja, os diâmetros encontrados serão úteis para especificar os acessórios da estação que ficam à montante e à jusante da válvula redutora. Considerando os dados de volume específico informados na tabela 8, temos que:

Diâmetro à montante da válvula, com vapor à pressão de 11kgf/cm<sup>2</sup>:

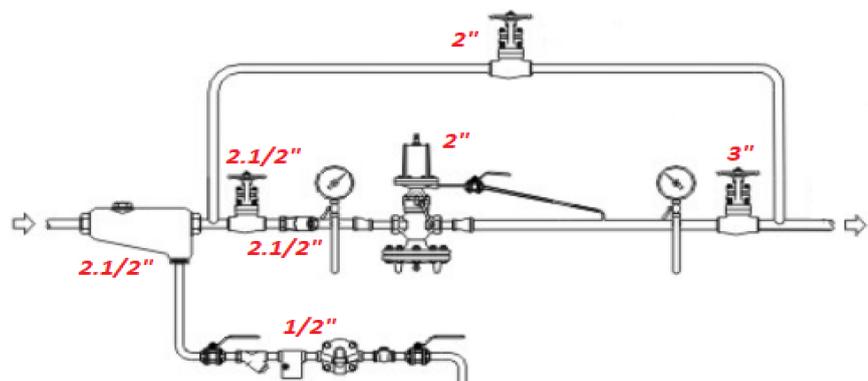
$$D_{m1} = 0,0629 \text{ m} = 2,47''$$

Diâmetro à jusante da válvula, com vapor à pressão de 8kgf/cm<sup>2</sup>:

$$D_{j1} = 0,0722 \text{ m} = 2,84''$$

Logo, sabemos que os itens à montante da válvula redutora serão de 2.1/2" e a válvula de bloqueio à jusante será de 3". Por fim, o diâmetro da válvula redutora será de 2" e foi dimensionada pelo fabricante fornecedor, já que é um produto específico que leva em conta suas variáveis de dimensionamento. Na figura 33 é possível compreender melhor.

Figura 33 - Ilustração da estação redutora da Etapa 1.



Fonte: Adaptado de Spirax Sarco, 2021.

Em maiores detalhes, a estação redutora da etapa 1 será composta por uma válvula redutora auto-operada, construída em ferro fundido, com diâmetro de 2" e com conexão NPT. As válvulas de bloqueio à montante, bloqueio à jusante e by-pass serão tipo globo com conexão flangeada ANSI 150#, nos diâmetros de 2.1/2", 3" e 2", respectivamente, todas também em ferro fundido. A estação também irá contar com dois manômetros à montante e à jusante da válvula, além de filtro Y de 2.1/2", construído em aço carbono e com tela do elemento filtrante com furos de 0,8mm. Por fim, a estação também irá contar com uma unidade qualificadora de vapor, composta por um separador de umidade horizontal de 2.1/2" e com conexão flangeada ANSI 150#, além de um conjunto de drenagem composto por três válvulas tipo esfera em aço carbono e purgador termodinâmico de fluxo distribuído em aço inoxidável, ambos com conexão tipo rosca NPT e diâmetro de 1/2". O investimento necessário segue especificado na tabela 16.

Tabela 16 - Investimento para aquisição da estação redutora de pressão para etapa 1

Item	Investimento
Estação redutora 2.1/2" x 3" para etapa 1.	R\$19.891,54

Fonte: Autor, 2021.

### 8.3.2 Estação redutora para etapa 2

Por outro lado, essa estação será responsável por reduzir a pressão de 11kgf/cm<sup>2</sup> para 4kgf/cm<sup>2</sup>. Para o dimensionamento também iremos considerar situação a caldeira possa atingir sua capacidade máxima de produção de 4.000 kg/h e, sendo assim, consideraremos 1.600kg/h.

De forma equivalente à estação anterior, é possível encontrar os diâmetros dos itens que compõem a estação, à montante e à jusante, considerando os dados de volume específico informados na tabela 8, e considerando uma velocidade de vapor de até 35m/s.

Diâmetro à montante da válvula, com vapor à pressão de 11kgf/cm<sup>2</sup>:

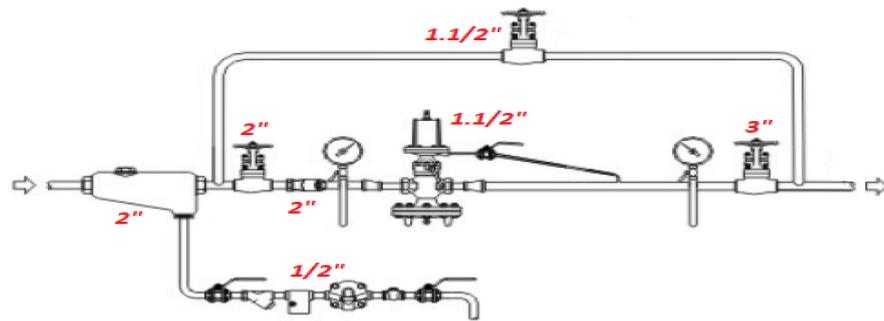
$$D_{m2} = = 0,0476 \text{ m} = 1,87''$$

Diâmetro à jusante da válvula, com vapor à pressão de 8kgf/cm<sup>2</sup>:

$$D_{j2} = = 0,0778 \text{ m} = 3,06''$$

Logo, adotaremos os itens à montante da válvula redutora com diâmetro de 2" e a válvula de bloqueio à jusante será de 3". O diâmetro da válvula redutora será de 1.1/2" e, de forma equivalente, foi dimensionada pelo fabricante fornecedor. De forma equivalente, é possível compreender melhor através da figura 34.

Figura 33 - Ilustração da estação redutora da Etapa 2.



Fonte: Adaptado de Spirax Sarco, 2021.

Também de forma equivalente à estação anterior, a estação da etapa 2 será composta com os mesmos itens, apenas em diâmetros diferentes, devido à diferença de vazão e pressão à jusante de cada estação. Em resumo, a estação redutora da etapa 2 também será composta por uma válvula redutora auto-operada, construída em ferro fundido, com diâmetro de 1.1/2" e com conexão NPT. As válvulas de bloqueio à montante, bloqueio à jusante e by-pass também serão tipo globo com conexão flangeada ANSI 150#, mas nos diâmetros de 2", 3" e 1.1/2", respectivamente, todas também em ferro fundido. A instalação dos manômetros à montante e à jusante da válvula também se faz necessário, além de filtro Y de 2", construído em aço carbono e com tela do elemento filtrante com furos de 0,8mm. Por fim, a estação também irá contar com uma unidade qualificadora de vapor, composta por um separador de umidade horizontal de 2" e com conexão flangeada ANSI 150#, além disso, para a drenagem do separador também será necessário um conjunto de purga composto por três válvulas tipo esfera em aço carbono e purgador termodinâmico de fluxo distribuído em aço inoxidável, ambos com diâmetro de 1/2" e conexão tipo rosca NPT. A tabela 17 informa o investimento necessário para a estação redutora da etapa 2.

Tabela 17 – Investimento para aquisição da estação redutora de pressão para etapa 2

Item	Investimento
Estação redutora 2" x 3" para etapa 1	R\$19.749,67

Fonte: Autor, 2021.

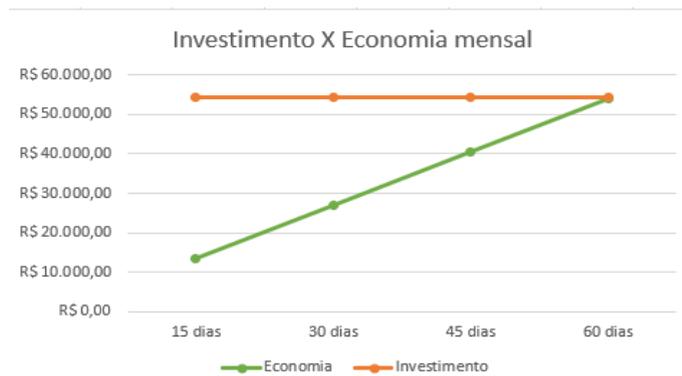
## 9 RESUMO DOS RESULTADOS

De acordo com todas as recomendações de melhorias que foram expostas, acredita-se em uma melhoria bastante considerável na eficiência energética do sistema, pois de maneira geral, as propostas de melhorias apresentadas neste projeto foram voltadas para a correção de vazamentos de vapor, para a melhoria da qualidade do vapor, para uma melhor adequação do sistema de drenagem e, por fim, para um uso inteligente das diferentes pressões de vapor possíveis para a utilização no sistema. São pontos que geram um impacto positivo à curto e a longo prazo, o qual pode ser refletido e especificado financeiramente.

Somando-se os valores calculados de desperdícios de vapor através de vazamentos em purgadores e da economia proveniente da redução de pressão, temos uma economia potencial de R\$27.052,27/mês caso as recomendações sejam seguidas, também podemos considerar os benefícios atrelados à melhoria da qualidade do vapor e adequação do sistema de drenagem, que proporcionará um aumento na vida útil dos equipamentos, tubulações e acessórios e, mesmo que esse ponto não possa ser quantificado, também deve ser levado em consideração.

Por outro lado, fazendo a soma total dos investimentos necessários para melhoria do sistema, englobando todas as recomendações especificadas, temos um total de R\$54.519,53 mais o custo de mão de obra de instalação que não foi considerado, tendo em vista que a mão de obra será fornecida pela própria equipe de manutenção da fábrica. Ou seja, levando em consideração apenas o custo de aquisição dos equipamentos e o valor potencial de economia mensal, temos um retorno de investimento de 1,96 mês. Em outras palavras, levaria aproximadamente 2 meses para recuperar o que foi investido através da economia de energia proporcionada pelo projeto, como podemos ver na figura 35.

Figura 34 - Relação temporal entre investimento e economia mensal.



Fonte: Autor, 2021.

## 10 CONCLUSÕES

O projeto teve como finalidade gerar uma economia energética e monetária considerável, através de soluções que impactassem os pontos de necessidade mais latentes, proporcionando um retorno de investimento em um curto período de tempo, além dos benefícios operacionais gerados à instalação de vapor da fábrica.

É válido ressaltar que por não possuir medidores de vazão na planta, foram feitas algumas considerações lógicas durante o processo de especificação das soluções, mas que poderiam ser mais assertivas e com isso proporcionar dados mais reais referente à economia mensal proporcionada pelas oportunidades identificadas, caso a vazão de cada processo fosse especificada através de um medidor.

Os cálculos de retorno de investimento foram realizados considerando implicitamente fatores importantes para os meses posteriores à adequação do sistema, por exemplo, não está sendo levado em conta que outros purgadores de vapor venham a falhar e apresentar vazamento de vapor vivo, além dos que foram rotulados como defeituosos, ou que algum maquinário apresente determinado defeito que impacte diretamente na integridade da transferência térmica do processo, ou quaisquer eventos que possam ocorrer e venham a impactar a eficiência energética do sistema e prejudicar a projeção do retorno de investimento.

Sendo assim, se faz necessário inspeções periódicas dos purgadores, tubulações, acessórios e equipamentos da planta, com objetivo de manter a integridade física do sistema, evitando complicações que possam prejudicar a análise de melhoria de eficiência energética.

Por fim, após a instalação dos equipamentos necessários para adequação de todas as recomendações especificadas, a economia energética e monetária mensal poderá ser mensurada através da quantidade de combustível adquirido mensalmente, em comparação

com a quantidade de combustível adquirido nos meses anteriores onde não ainda havia a adequação do sistema. Vale ressaltar, por motivos de registro histórico, que a cotação do dólar hoje, 05 de agosto de 2021, está a R\$5,24.

## REFERÊNCIAS

- Alborg: **Catálogo técnico de caldeiras**. Disponível em: <http://aalborg-industries.com.br/downloads/catalogo-caldeiras-aalborg.pdf>. Acesso 12 de jul. 2021.
- ALFATINI, C. R. Curso de Engenharia Mecânica Disciplina de Máquinas Térmicas. **Apostila sobre Caldeira**. Universidade de Caxias do Sul, 2002.
- ARLEI, Gilson. **Caixa de papelão**. Disponível em <http://gilsonarlei.blogspot.com/2011/01/diferenca-entre-as-ondas.html>. Acesso 05 de Ago. 2021.
- BARBOSA, João Marcelo Costa. **Modelagem computacional da válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio para o golpe de aríete**. 2010.
- BARTOLOTTO FILHO, Carlos; DE CAMPOS ROSENO, Karina Tamião. **Importance of traps in Industrial Processes**. Unisanta Science and Technology, v. 3, n. 2, p. 49-51, 2014.
- BAZZO, E., **Geração de vapor**, Editora da UFSC, 2ª Edição, 1995. 1 p.
- Bermo: **Tabela de vapor**. Disponível em <https://bermo.com.br/downloads/tabelas-tecnicas/>. Acesso 12 de jul. 2021.
- Caldeiras Flamotubulares**, Disponível em: [https://wiki.eq.uc.pt/mediawiki/index.php/Caldeiras\\_flamotubulares](https://wiki.eq.uc.pt/mediawiki/index.php/Caldeiras_flamotubulares). Acesso em: 24 jun. 2021.
- CARDOSO, Danilo Rossi de Oliveira. **Aumento da eficiência energética de uma instalação de geração de vapor por meio do reaproveitamento de energia em linhas de retorno de condensado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia.
- CHIELLE, Luís Paulo; FONTENELLE, Marcellus Tiburcio. **REUTILIZAÇÃO DO CONDENSADO UTILIZADO PARA AQUECIAMENTO DOS TANQUES DE GORDURA**. *Anais da Engenharia Mecânica/ISSN 2594-4649*, v. 4, n. 1, p. 206-222, 2019.

COGGIOLA, Osvaldo. **Da revolução industrial ao movimento operário**. As origens do mundo contemporâneo. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/287205625\\_Revolucion\\_Industrial\\_e\\_Movimento\\_Operario\\_As\\_origens\\_do\\_mundo\\_contemporaneo](https://www.researchgate.net/publication/287205625_Revolucion_Industrial_e_Movimento_Operario_As_origens_do_mundo_contemporaneo)> Acesso em, v. 9, n. 09, 2016.

**Como ler uma tabela de vapor**. Disponível em: <https://disparco.com.br/index.php/cursos/como-ler-uma-tabela-de-vapor-2?curso=teoria-do-vapor>. Acesso em 10 de jul. 2021

COSTA, W. **Estudo do Condicionamento Magnético da Água para Fins Industriais**. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Centro Universitário do Instituto de Mauá de Tecnologia. Escola de Engenharia de Mauá. 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.; BUESA, Ignacio Apraiz. **Termodinâmica**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

DAUMICHEN, R V. H. **Curso sobre distribuição de vapor**. Instituto Brasileiro de Petróleo, 1975.

DECOL A. M. F. **Linha de retorno para condensado e automatização da linha de vapor**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

DIAS, S. P. M. **Otimização da Rede de Vapor**. 2012. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em: Engenharia Química.

**Estação Redutora de Pressão Auto Operada SF MP-3010**. Disponível em: <http://www.casadacaldeira.com.br/home/produtos/valvula-redutora-de-pressao/estacao-redutora-de-pressao-auto-operada/>. Acesso 27 jul. 2021.

FERREIRA, Bruno Guilherme et al. **Análise e desenvolvimento da geração e distribuição de vapor para uma indústria alimentícia**. 2018.

Gas brasileiro: **Manual de instalações Gás Natural, segmento residencial e comercial**. disponível em <https://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/manual.pdf> . Acesso 12 de jul. 2021.

**Golpe de Aríete**. Disponível em: <<https://www.dulong.com.br/blog/golpe-de-ariete/>> . Acesso em 01 jul. 2021.

**Golpes de Aríete em Linhas de Vapor e Condensado**. <<https://pt.linkedin.com/pulse/golpes-de-ar%C3%ADete-em-linhas-vapor-e-condensado-guilherme-oliveira>> . Acesso em 01 jul. 2021.

**Guia para inspeção do purgador de vapor**. Disponível em: <https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/steam-trap-test.html>. Acesso em 11 de jul. 2021.

**Instrumentos de testes e medição.** Disponível em: <https://www.riolink.com.br/instrumentos-de-teste-e-medicao/termovisor/camera-termografica-fluke-tis20-10800-pixels>. Acesso 12 de jul. 2021.

KRIEGER, Elisabeth Ibi Frimm. **Avaliação do consumo de água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de um frigorífico de suínos na busca da sustentabilidade socioambiental da empresa.** 2007.

LEITE, Fernanda Barcelos do Carmo. **Inspeção e manutenção do sistema de purgadores de uma fábrica de pneus para redução do consumo de energia.** 2013.

LEITE, Nilson Ribero; MILITÃO, Renato de Abreu. **Tipos e aplicações de caldeiras.** Escola Politécnica-Depto. Enga. Mecânica. São Paulo, 2008.

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

MAKARENKO, Boris. **Curso sobre distribuição de vapor.** Instituto Brasileiro de Petróleo, 1975.

**Melhores Práticas para Remoção do Condensado nas Linhas de Vapor.** Disponível em: <https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/steam-lines-best-practices.html#:~:text=Tubula%C3%A7%C3%A3o%20deve%20ser%20instalada%20sob,n%C3%A3o%20inferior%20a%201%2F100>. Acesso em 24 jun. 2021.

NOGUEIRA, Renata Rocha. **Estudo da Distribuição de Vapor em um Complexo Químico Visando sua Otimização.** Universidade de São Paulo, 2014.

**NR-13. CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO.** Portaria SEPRT nº 915, de 30 de julho de 2019.

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

PEDERIVA, A. C.; MATTIONI, R. **Dimensionamento de uma tubulação de vapor para uma fábrica de ração animal.** Estudo parte da Terceira Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. 2013.

**Principais Tipos de Caldeiras.** Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em 24 jun. 2021.

Print Job Mexico: **Cartón Y sus usos.** disponível em <http://printjobmexico.blogspot.com/2013/05/carton-y-sus-usos.html>. Acesso 05 de Ago. 2021

**Purgadores de vapor. Que funções devem cumprir?** Disponível em: <https://pt.vaporparalaindustria.com/as-armadilhas-de-vapor-que-as-fun%C3%A7%C3%B5es-devem-atender/>. Acesso 12 jul. 2021.

**Purgador termostático para vapor.** Disponível em: <https://disparco.com.br/index.php/animacoes/l21s-purgador-termostatico-para-vapor> . Acesso em 01 jul. 2021.

SEBASTIÃO, Carlos Roberto. **Caldeiraria – Traçados de caldeiraria. Programa de Certificação de Pessoal de Caldeira.** SENAI, 2005.

**Separadores e seu papel no sistema de vapor.** Disponível em: <http://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/separators.html>. Acesso 12 de jul. 2021.

SILVA, Andressa Carla Cintra da. **Conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SOARES , Homero. **Hidráulica Geral.** Universidade Federal de Juiz de Fora,2012.

SPIRAX, S. **Bem vindo ao mundo do vapor** - Apostila de estudo do vapor. Disponível em: < <http://www.scribd.com/doc/25316074/apostila-sarco> >. Acesso em 10 de jul. 2021.

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

Spirax Sarco: **Manual de instalação e manutenção de válvulas auto-operadas 25S.** disponível em [http://www.enprocontrol.com.br/pdf/valvulas/V%C3%A1lvulas\\_Auto-Operadas\\_25S-Installation\\_Maintenance\\_Manual.pdf](http://www.enprocontrol.com.br/pdf/valvulas/V%C3%A1lvulas_Auto-Operadas_25S-Installation_Maintenance_Manual.pdf). Acesso 31 de jul. 2021.

**Tipos de bombas de condensado para sistema de vapor industrial.** Disponível em: <<https://pt.vaporparalaindustria.com/tipos-de-bombas-de-condensado-para-sistemas-de-vapor-industrial/>> . Acesso em 01 jul. 2021.

TOGAWA, Victor. **Uso do Vapor na Indústria.** Disponível em: <<https://togawaengenharia.com.br/blog/uso-do-vapor-na-industria/>> Acesso em 24. Jun. 2021.

**Vapor para a indústria.** Disponível em: <https://vaporparalaindustria.com/wp-content/uploads/2017/07/purga-de-lineas-de-vapor-4.png>. Acesso 12 jul. 2021.

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