



**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**ANA CAROLINA GIANNICO VIANA BISSOLI CONSOLINO**  
**LEONARDO GALVÃO DE CARVALHO**

**Eficiência Energética na Indústria: Aspectos voltados a geração de vapor e estudo de caso para sistemas de ar comprimido**

Taubaté - SP  
2018

**Ana Carolina Giannico Viana Bissoli Consolino  
Leonardo Galvão de Carvalho**

**Eficiência Energética na Indústria:** Aspectos da geração de vapor e estudo de caso de sistemas de ar comprimido

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis

Taubaté - SP  
2018

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

C755e Consolino, Ana Carolina Giannico Viana Bissoli  
Eficiência energética na indústria: aspectos voltados à geração de vapor  
e estudo de caso para sistemas de ar comprimido / Ana Carolina Giannico  
Viana Bissoli Consolino; Leonardo Galvão de Carvalho. -- 2018.  
121 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis, Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica.

1. Ar comprimido. 2. Eficiência energética. 3. Geração de Vapor. 4.  
Indústria. I. Título. II. Carvalho, Leonardo Galvão de. III. Graduação em  
Engenharia Elétrica e Eletrônica.

CDD – 621.53

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995



Universidade de Taubaté  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

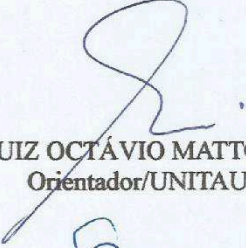
Departamento de Engenharia Elétrica  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA: ASPECTOS VOLTADOS A  
GERAÇÃO DE VAPOR E ESTUDO DE CASO PARA SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO**

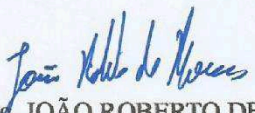
**ANA CAROLINA GIANNICO VIANA BISSOLI CONSOLINO  
LEONARDO GALVÃO DE CARVALHO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA"

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. DR. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS  
Orientador/UNITAU-DEE

  
Prof. ME. SEIDE DA CUNHA FILHO  
UNITAU-DEE

  
Eng. JOÃO ROBERTO DE MORAES  
UNITAU-DEE

dezembro de 2018



de modo especial, às nossas famílias e professores que ao longo dos anos nos incentivaram a manter a excelência e perseverar quanto aos resultados.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus pela vida que nos foi concebida e que nos fez trilhar os caminhos da Engenharia Elétrica.

Ao nosso orientador, *Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis* que jamais deixou de nos incentivar. Sem a sua orientação e ensinamentos este estudo não seria possível.

Aos nossos familiares *Dejair B. Consolino, Andrea Maria G. de A. V. Consolino, Sérgio H. de Carvalho e Jocimara Ap. G. de Carvalho e Lucas G. de Carvalho* que sempre estiveram presentes nos incentivando.

Às funcionárias da biblioteca que sempre com simpatia e disposição nos auxiliaram na busca dos melhores exemplares.

Às funcionárias da secretaria que ao longo destes anos não só nos auxiliaram com as documentações, mas também nos incentivaram na busca pelos melhores resultados.

Aos colegas de sala representados por *Yves Ferreira, Caio Chicarino, Lucas Sant' ana, Paulo Faustino, Hélcio Ribeiro e Adilson Leite*, que nestes cinco anos de convivência, além de parceiros se tornaram amigos.

Aos professores, representados na pessoa do *Prof Me. Seide da Cunha Filho* que com profissionalismo e dedicação nos ensinou as técnicas para nos tornarmos excelentes engenheiros.

Aos amigos da D.O.M, representados na pessoa da engenheira *Edna dos Santos*, que sempre com disposição e simpatia ensinou os princípios fundamentais da ética profissional.

Ao engenheiro *Abel Ourive Tizon* pela disposição e ajuda com o levantamento das informações contidas neste trabalho.

“A marca de uma inteligência de primeira ordem é a capacidade de ter duas ideias opostas presentes no espírito ao mesmo tempo e nem por isso deixar de funcionar.”

F. Scott Fitzgerald

CONSOLINO, A. C. G. V. B, CARVALHO, L. G. **Eficiência Energética na Indústria:** Aspectos da geração de vapor e estudo de caso de um sistema de ar comprimido. 2018. 121 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2018.

## **RESUMO**

Neste trabalho serão apresentados estudos que definem as técnicas de eficiência energética em sistemas industriais de ar comprimido e geração de vapor. A pesquisa envolveu o processo de auditoria energética para localizar os pontos vantajosos na aplicação da eficiência no uso de vapor e ar comprimido, visando a utilização de equipamentos que possuam o selo PROCEL de economia de energia. Foram estudados os aspectos históricos e conceituais aplicados à um estudo de gestão da eficiência energética em uma planta industrial, bem como a estrutura de tarifação da energia elétrica no Brasil acrescentando as cobranças de tributos no âmbito Estadual, Municipal e Federal. Em seguida estudou-se o funcionamento do sistema de ar comprimido e compressores, enfatizando sua faixa de utilização e recuperação da energia perdida no processo devido a vazões indevidas e ciclo operacional dos compressores. Apesar de existirem programas computacionais que podem ser utilizados para se efetuar a gestão energética o estudo foi desenvolvido no local de forma prática, medindo e identificando os pontos onde se pode obter resultados vantajosos na economia de energia e aplicando-os por meio de um estudo de caso. A mesma sistemática foi realizada no processo de geração de vapor, promovendo o balanço de energia das caldeiras, cálculo dos efluentes que podem gerar vazamentos, identificar as possibilidades de melhorias e oportunidades no âmbito econômico e energético em cada um dos elementos que compõem a caldeira. No âmbito da geração de vapor, verificou-se o sistema de desmineralização da água que alimenta as caldeiras de forma a reduzir a entrada de sais minerais. Outro aspecto considerado foi verificação da umidade do combustível, pois a presença de umidade reduz o PCI (poder calorífico inferior) do mesmo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética na indústria. Ar comprimido. Geração de vapor.

CONSOLINO, A. C. G. V. B, CARVALHO, L. G. **Energy Efficiency in Industry: Aspects of Steam Generation and Case Study of a Compressed Air System.** 2018. 121 p. Graduate Work in Electrical Engineering - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2018.

### **ABSTRACT**

In this work will be presented studies that define the techniques of energy efficiency in industrial systems of compressed air and steam generation. The research involved the energy audit process to locate the advantages in the application of efficiency in the use of steam and compressed air, aiming at the use of equipment that has the PROCEL seal of energy saving. We studied the historical and conceptual aspects applied to a study of energy efficiency management in an industrial plant, as well as the charging structure of electric energy in Brazil, adding tax collections at the State, Municipal and Federal levels. The compressed air system and compressors were then studied, emphasizing their use range and recovery of the energy lost in the process due to undue flow rates and operating cycle of the compressors. Although there are computer programs that can be used to carry out energy management, the study was carried out in-house in a practical way, measuring and identifying the points where one can obtain advantageous results in energy saving and applying them through a study of case. The same systematics was carried out in the steam generation process, promoting the energy balance of the boilers, calculating the effluents that can generate leaks, identifying the possibilities of improvements and opportunities in the economic and energetic scope in each one of the elements that compose the boiler. In the generation of steam, the water demineralization system that fed the boilers was verified in order to reduce the entrance of mineral salts. Another aspect considered was verification of the fuel humidity, since the presence of humidity reduces the ICP (lower calorific value) of the same.

**KEYWORDS:** Energy efficiency in industry. Compressed air. Steam Generation.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	12
1.2 OBJETIVO .....	12
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	13
<b>2 ENERGIA .....</b>	<b>14</b>
<b>3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....</b>	<b>15</b>
3.1 DEFINIÇÕES IMPORTANTES .....	16
<b>4 TARIFICAÇÃO DE ENERGIA.....</b>	<b>18</b>
4.1 COMPOSIÇÃO DA TARIFA.....	18
4.2 TIPOS DE TARIFAS .....	19
4.3 ESTRUTURA TARIFÁRIA .....	19
4.4 TRIBUTOS DO SETOR ELÉTRICO.....	20
<b>4.4.1 Tributos Federais.....</b>	<b>20</b>
<b>4.4.2 Tributos Estaduais.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4.3 Tributos Municipais .....</b>	<b>21</b>
4.5 TIPOS DE CONSUMIDORES .....	22
<b>4.5.1 Consumidores livres .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5.2 Consumidores cativos.....</b>	<b>23</b>
<b>5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO .....</b>	<b>24</b>
5.1 AR ATMOSFÉRICO E AR COMPRIMIDO .....	24
<b>5.1.1 Ponto de orvalho do ar comprimido .....</b>	<b>25</b>
5.2 COMPRESSÃO .....	26
<b>5.2.1 Conceitos básicos sobre pressão .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2.2 Conceitos básicos sobre temperatura .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.3 Conceitos básicos sobre volume.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.4 Tipos de compressão.....</b>	<b>29</b>
5.3 CUSTO DO AR COMPRIMIDO .....	29
5.4 GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	31
<b>5.4.1 Compressores .....</b>	<b>32</b>
5.4.1.1 Tipos de compressores .....	34
5.4.1.1.1 Compressores recíprocos.....	34
5.4.1.1.2 Compressores à parafuso .....	35



5.4.1.1.3 Compressores centrífugos .....	37
5.4.1.1.4 Compressores axiais .....	37
<b>5.4.2 Reservatório de ar .....</b>	<b>38</b>
5.4.2.1 Instalação dos reservatórios.....	38
5.4.2.2 Cálculo do volume do reservatório.....	40
5.5 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO .....	41
<b>5.5.1 Qualidade do ar comprimido .....</b>	<b>42</b>
<b>5.5.2 Secagem do ar comprimido .....</b>	<b>43</b>
5.5.2.1 Secagem por resfriamento .....	43
5.5.2.2 Secagem por absorção .....	43
5.5.2.3 Secagem por adsorção .....	44
<b>5.5.3 Filtragem do ar comprimido .....</b>	<b>44</b>
<b>5.5.4 Drenagem do condensado .....</b>	<b>45</b>
5.6 PROJETO EFICIENTE DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO .....	46
<b>5.6.1 Pressão de trabalho .....</b>	<b>48</b>
<b>5.6.2 Determinação da capacidade necessária do compressor .....</b>	<b>49</b>
<b>5.6.3 Sistema centralizado e descentralizado .....</b>	<b>52</b>
<b>5.6.4 Sistema de distribuição .....</b>	<b>52</b>
5.6.4.1 Dimensionamento das tubulações das redes de distribuição .....	53
5.7 MEDIDAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO .....	55
<b>5.7.1 Medidas de eficiência energética em um sistema genérico .....</b>	<b>56</b>
<b>5.7.2 Medidas de eficiência energética em um sistema específico .....</b>	<b>57</b>
5.7.2.1 Dimensionamento correto do compressor .....	58
5.7.2.1.1 Cuidados com superdimensionamento do compressor.....	59
5.7.2.2 Redução da temperatura aspirada pelo compressor.....	60
5.7.2.3 Dimensionamento correto da pressão de desarme.....	61
5.7.2.4 Recuperação da energia térmica perdida na compressão .....	63
5.7.2.5 Tratamento adequado do ar comprimido.....	65
5.7.2.6 Redução das perdas por vazamento nas linhas de distribuição .....	66
5.7.2.6.1 Economia por redução dos vazamentos.....	67
5.7.2.6.2 Maior atuação de purgadores.....	68
5.7.2.7 Implementação de um sistema de controle carga – alívio – parada .....	70
5.7.2.8 Utilização adequada do ar comprimido para evitar desperdícios .....	71

<b>6 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR .....</b>	<b>73</b>
6.1 FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE VAPOR .....	73
6.2 COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO .....	74
<b>6.2.1 Combustível.....</b>	<b>74</b>
<b>6.2.2 Combustão.....</b>	<b>74</b>
6.2.2.1 Poder calorífico de combustíveis.....	75
6.3 EXCESSO DE AR .....	76
6.4 EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO.....	77
<b>6.4.1. Fornalhas.....</b>	<b>77</b>
<b>6.4.2 Queimadores .....</b>	<b>78</b>
6.4.2.1 Pulverização à ar.....	78
6.4.2.2 Pulverização à vapor.....	78
6.4.2.3 Queimador de copo rotativo .....	79
6.4.2.4 Pulverização mecânica .....	79
6.4.2.5 Queimadores de combustíveis gasosos .....	79
6.4.2.6 Queimadores de combustíveis sólidos pulverizados .....	79
<b>6.4.3 Tiragem .....</b>	<b>80</b>
6.5 GERADORES DE VAPOR .....	80
<b>6.5.1 Caldeiras.....</b>	<b>80</b>
6.5.1.1 Componentes clássicos de uma caldeira.....	81
<b>6.5.2 Caldeiras flamotubulares.....</b>	<b>81</b>
<b>6.5.3 Caldeiras aquotubulares .....</b>	<b>82</b>
6.5.3.1 Circulação da água em caldeiras aquotubulares .....	83
<b>6.5.4 Eficiência térmica .....</b>	<b>83</b>
<b>6.5.5 Grau de combusto e vaporização específica.....</b>	<b>84</b>
<b>6.5.6 Superaquecedores.....</b>	<b>84</b>
<b>6.5.7 Economizadores e Pré-aquecedores.....</b>	<b>84</b>
6.6 ALIMENTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS .....	84
<b>6.6.1 Sistema de abastecimento de água .....</b>	<b>85</b>
<b>6.6.2 Tratamentos anteriores ao reabastecimento.....</b>	<b>86</b>
6.6.2.1 Clarificação.....	86
6.6.2.2 Abrandamento .....	87
6.6.2.2.1 Precipitação química.....	87
6.6.2.2.2 Troca iônica .....	87

6.6.2.3 Desmineralização.....	88
6.6.2.4 Desareação.....	88
<b>6.6.3 Tratamento posterior ao abastecimento.....</b>	<b>89</b>
6.7 CONTAMINANTES.....	89
6.8 MEDIÇÃO .....	90
<b>6.8.1 Sistemas de medição .....</b>	<b>90</b>
<b>6.8.2 Sistema de medição do nível de água.....</b>	<b>90</b>
<b>6.8.3 Sistema de medição da pressão .....</b>	<b>91</b>
<b>6.8.4 Sistemas de medição de temperatura .....</b>	<b>91</b>
<b>6.8.5 Sistemas de medição de vazão .....</b>	<b>92</b>
6.9 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR .....	92
<b>6.9.1 Aspectos das instalações industriais.....</b>	<b>92</b>
6.9.1.1 Purgadores de vapor .....	93
<b>6.9.2 Estruturas Isolantes.....</b>	<b>93</b>
6.10 OPERAÇÃO DE GERADORES DE VAPOR .....	94
<b>6.10.1 Placa de Identificação e normas de segurança.....</b>	<b>94</b>
<b>6.10.2 Procedimentos.....</b>	<b>95</b>
6.10.2.1 Partida.....	95
6.10.2.2 Parada .....	95
6.12 MEDIDAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR.....	98
<b>6.12.1 Oportunidades de melhoria em um sistema de vapor genérico .....</b>	<b>98</b>
<b>6.12.2 Medidas de eficiência energética em um sistema específico .....</b>	<b>100</b>
6.12.2.1 Eficiência térmica do gerador de vapor.....	100
6.12.2.1.1 Método direto .....	100
6.12.2.2 Redução de excesso de ar e aumento na eficiência da combustão .....	101
6.12.2.3 Redução das perdas de calor associadas a umidade no combustível.....	102
6.12.2.4 Utilização de um sistema de descarga de fundo .....	103
<b>6.12.3 Fatores que afetam a eficiência .....</b>	<b>103</b>
<b>6.12.4 Vazamento de vapor.....</b>	<b>103</b>
<b>7. ESTUDO DE CASO EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....</b>	<b>106</b>
7.1 ESTUDO CLIMATOLÓGICO DO LOCAL EM QUE A EMPRESA ESTÁ INSTALADA .....	107
7.2 PERCENTUAL DE VAZAMENTOS .....	109
<b>7.2.1 Análise dos custos das perdas .....</b>	<b>111</b>

<b>7.2.2 Medidas propostas e porcentagem de redução .....</b>	<b>111</b>
<b>7.2.3 Vantagens de utilização de um aftercooler e secador.....</b>	<b>112</b>
7.2.3.1 Aftercooler.....	112
7.2.3.1 Secador .....	113
<b>7.3 ENERGIA RECUPERADA .....</b>	<b>114</b>
<b>7.3.1 Ganho da instalação dos trocadores de calor.....</b>	<b>114</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente avanço tecnológico e conseqüente expansão do consumo de energia somado à complexidade de sua produção, difundiu o termo Eficiência Energética como fundamental para a indústria moderna. No Brasil, programas como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), Programa Nacional da Racionalização do uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) foram criados visando incentivar políticas antidesperdício de modo a favorecer as empresas que praticam a sustentabilidade.

Portanto, a busca pela redução dos gastos com os métodos convencionais vem chamando a atenção de empresas que trabalham com sistemas de ar comprimido e produção de vapor, uma vez que suas diversas aplicações são essenciais para processos pneumáticos, laminação, distribuição de óleos pesados, entre outros.

No decorrer deste trabalho serão apresentadas as estruturas e componentes dos sistemas de ar comprimido, bem como a análise do dimensionamento dos compressores, ponto de orvalho e utilização de purgadores, além da geração de vapor por caldeiras. Serão apresentados o abastecimento da água, procedimentos de partida dos mesmos, e as tarifas vigentes no Brasil.

Por fim, um estudo de caso foi realizado em uma empresa multinacional, onde serão aplicados os conceitos e métodos empregados em auditorias de eficiência energética apontados ao longo dos capítulos, estimando-se a redução dos custos da compressão e vazamentos da mesma.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Este trabalho é motivado pela contribuição que um sistema de geração de vapor e ar comprimido eficiente gera às indústrias, a partir da adoção de medidas que reduzam as perdas com vazamentos e garantam a qualidade dos produtos obtidos.

### 1.2 OBJETIVO

Estudar os componentes dos sistemas de geração de ar comprimido e vapor, levantar os métodos empregados em auditorias de eficiência energética para ambos os sistemas, e efetuar

um estudo de caso para uma indústria que utiliza ar comprimido em máquinas pneumáticas, estimando os custos com a aplicação dos métodos apresentados.

### 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento está organizado em oito capítulos. No capítulo inicial apresenta-se de modo introdutório os objetivos e motivação para a realização deste trabalho, abordando nos dois capítulos seguintes os conceitos de energia e eficiência energética, que são de suma importância para efetivação do objetivo.

O quarto capítulo contempla a estrutura tarifária brasileira, no âmbito energético, bem como os tipos de tributos e consumidores;

No quinto capítulo inicia-se a abordagem da eficiência energética em sistemas de ar comprimido com as terminologias de ar atmosférico, ponto de orvalho, pressão, temperatura e volume. Ainda neste capítulo são caracterizados os componentes presentes no sistema, como compressores e reservatório de ar, além dos processos para o tratamento do ar comprimido, como secagem, filtração e drenagem do condensado e os métodos empregados para a elaboração de um projeto eficiente na geração de ar comprimido. Finaliza-se este capítulo com as medidas de eficiência energética em sistemas genéricos e específicos, como a redução de perdas por vazamentos e atuação dos purgadores.

O sexto capítulo aborda de maneira geral a eficiência energética na geração de vapor, apresentando o funcionamento do sistema, equipamentos utilizados na combustão, como fornalhas, queimadores e caldeiras, o tratamento da água abastecimento das caldeiras, sistemas de medição, e termina com as oportunidades de melhoria, como eficiência térmica do gerador e redução das perdas associadas a umidade no combustível.

Após a apresentação bibliográfica de ambos os sistemas, no sétimo capítulo estuda-se o caso para um sistema de ar comprimido industrial, contemplando a análise climatológica do local em que a empresa está instalada, o percentual de vazamentos e medidas propostas para a sua redução, vantagens de utilização de um aftercooler e secador, e o ganho com a instalação de trocadores de calor.

Por fim, conclui-se este trabalho no capítulo oito, onde serão apresentados os resultados obtidos com a pesquisa.



## 2 ENERGIA

O conceito de energia deve ser analisado quando se propõe um trabalho de graduação em eficiência energética. De modo generalizado, energia representa a capacidade de algo realizar trabalho, contudo esse termo é demasiado complexo se comparado à importância que a energia tem para a sobrevivência dos seres vivos.

A palavra energia foi utilizada pela primeira vez em 1807 pelo físico e médico inglês Thomas Young e é originada do grego *enérgea*, cujo significado envolve a capacidade de realizar trabalho. Ao longo dos anos, estudiosos como Leibniz (1646-1695) e Lagrange (1736-1813) contribuíram para a formação do conceito hoje utilizado, associando ao calor fenômenos relativos ao movimento, estruturando o posterior Princípio de Conservação da Energia (BUCUSSI, 2006).

Assim como os cientistas já citados, Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) criou a Lei de Conservação de Massa descrita atualmente como: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. Ao criar esta lei ele acabou contribuindo para outro conceito de energia, transformação, visto que, assim como na natureza ela não pode ser destruída ou criada, mas transformada por meio de equipamentos ou efeitos químicos em outra forma de energia.

As necessidades energéticas do homem, juntamente com a revolução industrial e o domínio do petróleo se desenvolveram ao longo dos anos, de modo que o consumo se tornou parte da essência humana. Em contrapartida o elevado consumo ocasionou impactos ambientais irreversíveis, o que alavancou a busca por fontes alternativas e limpas de energia, principalmente no ramo industrial.

“Nós seres humanos necessitamos de energia para sobrevivermos, e estamos o tempo todo trocando energia com o meio ambiente no nosso dia-a-dia, seja fornecendo a energia de nossos corpos, ou seja, recebendo energia dos outros seres vivos ou de outras fontes de energia, como o fogo, a eletricidade, o vento e muitas outras (EDP, 2012).”

Seja para conservar alimentos, que também são fontes de energia, ou enviar uma mensagem pelo celular, a energia está presente, e pela vastidão de opções e prazeres que ela oferece, sua preservação e atenção ao desperdício é imprescindível.

Para tanto será adotado neste trabalho a conceituação de eficiência energética, tema que é comumente abordado na indústria e possui amplas aplicações.

### 3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo ABESCO (s.d), eficiência energética por definição consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para a sua realização, ou seja, a capacidade de utilizar menos energia mantendo os mesmos níveis de produção e qualidade.

Os equipamentos em geral que necessitam de energia para o seu funcionamento tais como eletrodomésticos, eletroeletrônicos, motores e lâmpadas, podem sofrer ajustes na utilização para evitar desperdícios. Estas mudanças por sua vez requerem análise e cuidados de especialistas, tendo em vista que qualquer alteração em um sistema deve ser acompanhada e planejada de modo que se mantenha a sua finalidade (S.A, 2012).

A preocupação com eficiência energética se evidenciou com os choques do petróleo de 1973-74 e 1979-81, que trouxeram a percepção de escassez deste recurso e consequente aumento nos preços dos energéticos. Através da diversidade das medidas disponíveis e a análise correta das oportunidades de implementação das chamadas Medidas de Eficiência Energética (MME), surgiu ainda na década de 80 a chamada indústria de Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ESCOS), cujo o lucro se dá mediante contrato proporcional aos resultados econômicos obtidos (BRASIL, 2007).

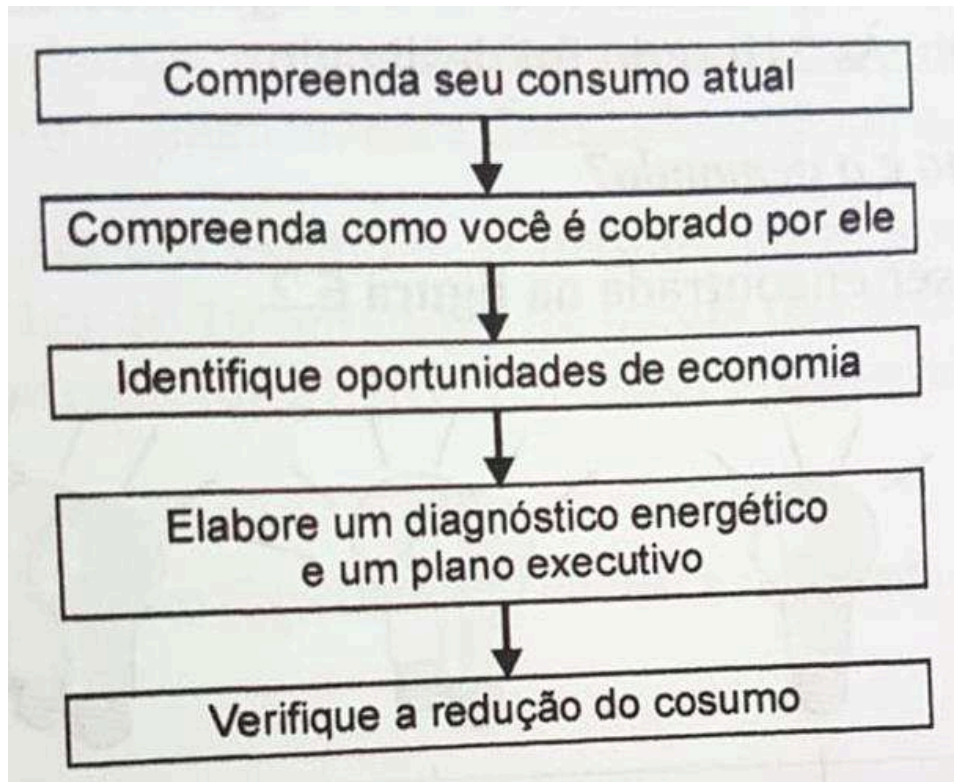
Com a repercussão em fóruns climáticos, esse tema tornou-se instrumento privilegiado de países que se empenham na redução da emissão de gases causadores do efeito estufa e consequente crescimento econômico. O Brasil por exemplo possui programas como o PROCEL, CONPET e PBE, que são reconhecidos internacionalmente. O PROCEL, foi criado em 1985 com a intenção de divulgar manuais destinados à conservação de energia elétrica e combate ao desperdício. Ele é coordenado pelo MME e executado pela Eletrobras, atuando em áreas como: Edificações, Iluminação Pública, Indústria, Conhecimento e Equipamentos, onde se aplica o Selo Procel que identifica os produtos mais eficientes do mercado (BRASIL, 2011).

O CONPET por sua vez, instituído por decreto presidencial em 1991, tem a finalidade desde a sua criação de promover uma cultura antidesperdício no uso dos recursos naturais não renováveis no Brasil, através de ações educativas para garantir um país melhor para as futuras gerações (CONPET,2012).

Coordenado pelo Inmetro, o PBE fornece informações apresentadas em faixas coloridas após o teste dos produtos. No caso da eficiência energética, a classificação (A) representa elevada eficiência, o que representa menor impacto ambiental, custo de produção e gasto energético mensal (INMETRO, s.d.).

Respeitando as entidades acima mencionadas bem como seus respectivos procedimentos, Capelli (2017) definiu 5 passos para que os projetos atinjam uma boa eficiência energética, apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Passos para a eficiência energética em projetos



Fonte: (CAPELLI, 2017).

### 3.1 DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Ao se estudar eficiência energética é preciso conhecer certas definições utilizadas pela Engenharia de Energia, como consumo, demanda e fator de carga:

- Consumo é a energia gasta durante o tempo de utilização, sendo medido em kWh.
- A Demanda energética por sua vez é a quantidade de energia solicitada pelo consumidor à concessionária, sendo integrada em determinado intervalo de tempo, o que no Brasil equivale à 15 minutos, onde o máximo valor atingido mesmo que em pouco tempo representa em termos práticos a potência instantânea que será considerada na cobrança (CAPELLI, 2017).

- c) O Fator de carga é um índice que varia de 0 à 1 e permite verificar a relação entre o consumo e a demanda em função do número médio de horas em um mês. Quanto mais próximo de 1 for esta relação, melhor é a eficiência energética do sistema.

## 4 TARIFAÇÃO DE ENERGIA

Segundo Abradee (s.d.), a tarifa de energia é o preço cobrado por unidade de energia (R\$/kWh), sendo este formado pelos custos e impostos atribuídos desde a geração até a distribuição de energia aos consumidores e sua disponibilidade diária, o que difere de acordo com a região e concessionária que a administra.

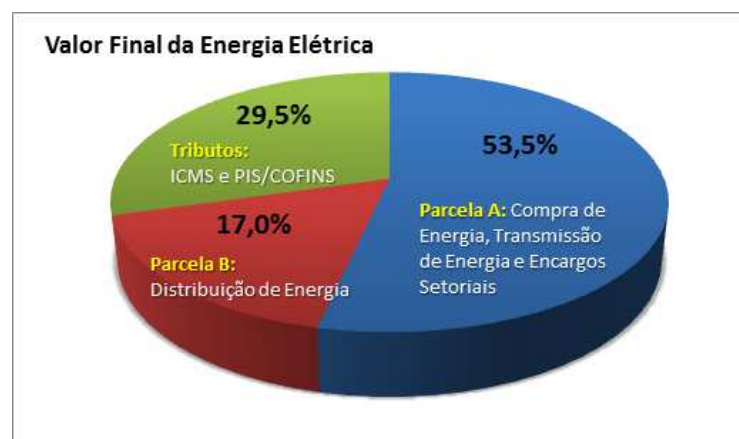
### 4.1 COMPOSIÇÃO DA TARIFA

Segundo Aneel (2017), para fornecer energia elétrica com qualidade, a distribuidora considera para a formulação da tarifa três custos distintos: energia gerada, transporte até os consumidores e encargos setoriais. Além da tarifa, os Governos Federal, Estadual e Municipal cobram na conta o Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), o Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e a Contribuição para a iluminação pública (CIP).

O fluxo do transporte de energia é definido em duas vertentes, a transmissão, que entrega a energia à concessionária, e a distribuição que é responsável por levar a energia para a unidade consumidora.

Conforme observa-se na Figura 2, os custos com a compra, transmissão e encargos instituídos por leis representam mais da metade do valor final da energia elétrica (53,5%), enquanto a manutenção do sistema de distribuição representa apenas 17% dos custos das tarifas (ANEEL, 2017).

Figura 2 – Valor Final da Energia Elétrica



Fonte: (ANEEL, 2017).

## 4.2 TIPOS DE TARIFAS

As unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários: Grupo A e Grupo B. A monômnia, conhecida como Grupo B, é aplicada em fornecimento de baixa tensão, inferior a 2,3kV e ocorre em função do consumo direto em kWh independente do horário e da época do ano. Esse grupo de consumidores podem ser residencial (B1), rural (B2), demais classes (B3) e iluminação pública (B4) (CAPELLI, 2017).

Na tarifa binômnia por sua vez conhecida como Grupo A, compreende consumidores em alta tensão e fatura-se o consumo e a demanda. Este grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, sendo A1 (230 kV ou mais), A2 (88 à 138kV), A3 (69kV), A3a (30 à 44kV), A4 (2,3 à 25kV) e AS (Sistema subterrâneo) (GUEDES, 2011).

## 4.3 ESTRUTURA TARIFÁRIA

No Brasil, as tarifas do Grupo A possuem três modalidades de fornecimento:

- a) Convencional (Subgrupos A3a, A4 e AS);
- b) Horo-sazonal Verde (Subgrupos A3a, A4 e AS);
- c) Horo-sazonal Azul (Obrigatória para os Subgrupos A1, A2 e A3 e facultativa para A3a, A4 e AS).

A estrutura Convencional exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor (contratada), que independe do período do ano (seco ou úmido) e da hora do dia (ponta ou fora de ponta). A fatura desse tipo de consumidor é composta pelo consumo, demanda e tarifa de ultrapassagem, que é cobrada apenas quando a demanda medida supera em mais de 10% a demanda contratada (GUEDES, 2011).

$$P_{Consumo} = T_{Consumo} \cdot C_{Medido} \quad (1)$$

$$P_{Demanda} = T_{Demanda} \cdot D_{Contratada} \quad (2)$$

$$P_{Ultrapassagem} = T_{Ultrapassagem} \cdot (D_{Medida} - D_{Contratada}) \quad (3)$$



A estrutura Horo-sazonal Verde diferente da Convencional, permite que sejam contratados dois valores diferentes de demanda, um para o período seco e outro para o úmido, e sua fatura é composta pelo consumo, equação (4), demanda, equação (2), e ultrapassagem, equação (3).

$$PV_{Consumo} = T_{ConsumoPonta} \cdot C_{MedidoPonta} + T_{ConsumoForaPonta} \cdot C_{MedidoForaPonta} \quad (4)$$

A estrutura Horo-sazonal Azul por sua vez, apresenta contratos com valores pactuados para os diferentes períodos do ano e hora do dia, sendo composta pelo consumo, equação (4), demanda e ultrapassagem, apresentadas a baixo nas equações (5) e (6).

$$PA_{Demanda} = T_{DemandaPonta} \cdot D_{ContratadaPonta} + T_{DemandaForaPonta} \cdot D_{ContratadaForaPonta} \quad (5)$$

$$PA_{Ultrapassagem} = T_{UltrapassagemPonta} \cdot (D_{MedidaPonta} - D_{ContratadaPonta}) + T_{UltrapassagemForaPonta} \cdot (D_{MedidaForaPonta} - D_{ContratadaForaPonta}) \quad (6)$$

#### 4.4 TRIBUTOS DO SETOR ELÉTRICO

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela publicação do valor da tarifa de energia elétrica sem tributos (municipais, estaduais ou federais). As distribuidoras de energia por sua vez acrescentam os tributos e repassam os mesmos para os cofres públicos (GUEDES, 2011).

##### 4.4.1 Tributos Federais

O PIS e COFINS são tributos cobrados pela união para manter programas sociais do Governo Federal e programas voltados ao trabalhador. A alíquota desses tributos, de 1,65% (PIS) e 7,6% (COFINS) é apurada de forma não cumulativa, ou seja, sua média varia com o volume de créditos mensais das concessionárias, com o pagamento do PIS e a COFINS pagos sobre custos e despesas com a energia adquirida no período (ANEEL, 2008). A Tabela 1 mostra o cálculo dos tributos federais.

Tabela 1 – Cálculo dos tributos federais

Sistema anterior (cumulativo):		Sistema atual (não cumulativo):	
Alíquotas		Alíquotas	
PIS - 0,65%		PIS - 1,65%	
COFINS - 3,00%		COFINS - 7,6%	
Exemplo – cumulativo		Exemplo - não cumulativo	
Faturamento Bruto	R\$10.000,00	Faturamento Bruto	R\$10.000,00
PIS	R\$65,00	PIS	R\$165,00
COFINS	R\$300,00	COFINS	R\$760,00
		1- PIS/COFINS a débito	R\$925,00
		Custo e/ou Despesas	R\$4.000,00
		2- PIS/COFINS a crédito (incidente sobre os custos e despesas)	R\$370,00
		PIS/COFINS a pagas (1-2)	R\$550,00
Alíquota "efetiva ou média"	3,65%	Alíquota "efetiva ou média"	5,55%

Fonte: (Adaptado de ANEEL, 2008).

#### 4.4.2 Tributos Estaduais

O Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) é previsto na Constituição Federal de 1988 e de responsabilidade dos governos estaduais e Distrito Federal. Ele incide sobre as movimentações referentes à mercadorias e serviços variando de cada estado, sendo seu cálculo feito “por dentro”, como observado a baixo (ANEEL,2008).

O cálculo dos tributos “por dentro” é mostrado na equação (7), adaptada de Aneel (2008).

$$Valor_{a\ ser\ cobrado\ do\ consumidor} = \frac{Valor_{da\ tarifa\ publicada\ pela\ ANEEL}}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \quad (7)$$

#### 4.4.3 Tributos Municipais

A CIP (Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública) é prevista na constituição federal de 1988, e é de responsabilidade do Poder Público Municipal todo serviço,

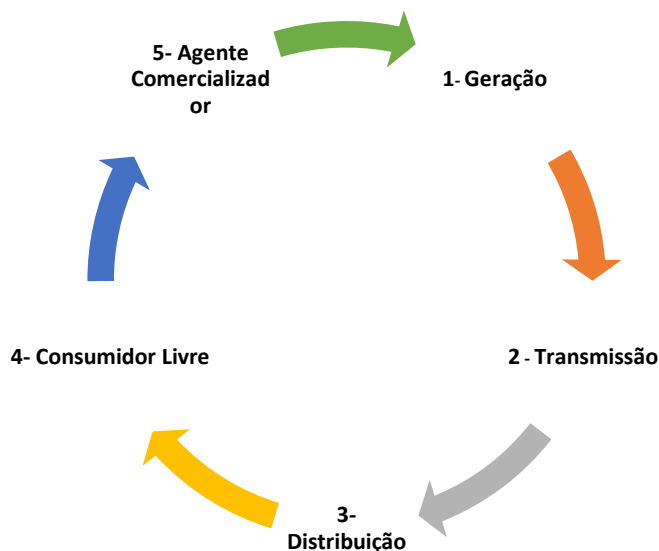
projeto e manutenção das instalações de iluminação pública. As concessionárias apenas arrecadam e repassam a CIP ao município (GUEDES, 2011).

#### 4.5 TIPOS DE CONSUMIDORES

##### 4.5.1 Consumidores livres

Essa categoria de consumidor, diferente do cativo, pode negociar livremente a energia a ser consumida, como representado na Figura 3. Existem dois tipos de Consumidores Livres, classificados de acordo com a demanda contratada. No primeiro caso, empresas com demanda contratada igual ou superior a 3.000kW podem adquirir energia de qualquer fonte de geração, incluindo usinas hidrelétricas, térmicas e eólicas. Entretanto, enquadra-se também como consumidor livre as empresas com contratação superior a 500kW, sendo este valor resultado do somatório ou não de outras empresas com o mesmo Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ), podendo adquirir energia gerada por fontes renováveis, eólicas, pequenas centrais hidrelétricas (PCH), entre outras (CÔMERC ENERGIA, s.d.).

Figura 3 – Fluxo de Consumidor Livre



Fonte: (Adaptado de CÔMERC, s.d).

#### **4.5.2 Consumidores cativos**

Consumidor cativo é aquele que só pode comprar energia elétrica de sua distribuidora local, como o Consumidor Residencial. Haja vista que a maioria da população se enquadra nesse tipo de consumo, os custos da tarifa são calculados com base em 5 fatores: aquisição de energia elétrica, sistema de distribuição, sistema de transmissão, perdas técnicas e não técnicas, encargos e impostos (ABRADEE, s.d.).

## 5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

### 5.1 AR ATMOSFÉRICO E AR COMPRIMIDO

O ar atmosférico é composto por gases em diferentes proporções sendo o nitrogênio e o oxigênio os mais abundantes, enquanto o gás carbônico e os gases nobres são considerados em menor quantidade, como mostrado na Figura 4 (MORAES, s.d).

Além dos gases citados o ar atmosférico possui vapor d'água cuja presença varia em função das condições climáticas do local, partículas de poeira e microrganismos (MORAES, s.d).

Figura 4 - Composição do ar atmosférico



Fonte: (MORAES, s.d.)

O vapor d'água existente no ar permanece em equilíbrio devido a junção da pressão de vaporização da água com a do ar seco, obtendo como produto a chamada pressão atmosférica. Com o aumento da pressão de vaporização, grande parte dessa mistura é perdida a partir da mudança para o estado líquido. O ar atmosférico por sua vez não possui energia para realizar trabalho, estando em equilíbrio na pressão atmosférica, exceto quando sofre compressão sendo denominado ar comprimido (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O ar comprimido, que é muito utilizado na pneumática, quando parado não realiza trabalho e só o fará quando movimentar-se pelas tubulações até o local de sua aplicação, onde sua energia potencial será transformada em energia cinética até que ele se desloque para o local onde realizará trabalho (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Este movimento do ar, ou seja, sua vazão é dada pela equação (8). A vazão é o volume de um determinado fluido que passa por uma área de tubos, encanamento em determinado

período de tempo. A unidade de vazão é a mesma para o sistema internacional e sistema técnico, em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), e para o sistema inglês a vazão é dada em pés cúbicos por minuto (cfm).

$$Q = A \cdot v \quad (8)$$

Onde:

Q = Vazão, em  $m^3/s$

A = Área da seção de passagem do tubo, em  $m^2$

v = Velocidade do ar na seção de passagem, em m/s

Outro conceito importante é a vazão volumétrica. Segundo Rocha e Monteiro (2005), a vazão volumétrica é a quantidade ou volume de ar comprimido produzido em determinado período de tempo. Existem três tipos de vazões volumétricas e cada uma se refere ao tipo de volume determinado, que pode ser de ar livre, normal ou de ar efetivo. Estes volumes serão descritos neste trabalho.

A vazão de ar livre (DLL) é referida ao volume de ar livre, sua unidade é  $m^3/s$ . A vazão efetiva (DLE) é referida ao volume de ar efetivo, sua unidade é  $m^3/s$ , e a vazão normal (DLP) é referida ao volume normal, sua unidade é  $Nm^3/s$ .

### 5.1.1 Ponto de orvalho do ar comprimido

Para tornar-se possível o entendimento dos processos necessários para o tratamento do ar comprimido, um dos termos mais importantes a ser compreendido é o ponto de orvalho. O ponto de orvalho é a temperatura na qual o vapor de água presente no ar passa para o estado líquido, processo denominado condensação. Como o compressor aumenta a temperatura do ar, qualquer diminuição de temperatura iniciará a condensação (ROLLINS, 2004).

Além do ponto de orvalho, existe o ponto de orvalho de pressão, que é indicado por secadores de refrigeração, enquanto ponto de orvalho atmosférico é indicado por secadores de absorção. O ponto de orvalho de pressão pode ser transformado em ponto de orvalho atmosférico por meio de gráficos e estudos (ROLLINS, 2004).

## 5.2 COMPRESSÃO

O processo de compressão utilizado na geração do ar comprimido desempenha a função de aumentar a pressão do ar, e para compreender este processo são necessárias algumas considerações e conceitos importantes.

A equação geral dos gases, mostrada na equação (9), desenvolvida com o estudo do comportamento dos gases por vários pesquisadores é formada por três grandezas e as relacionam por meio de três transformações, isovolumétrica, isotérmica e isobárica.

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (9)$$

Onde:

P = Pressão, em Pa

V = Volume, em m<sup>3</sup>

T = Temperatura, em K

Neste trabalho considera-se as grandezas no Sistema Internacional, portanto deve-se atentar às conversões necessárias caso seja utilizado outro sistema de unidade.

Segundo Fogaça (s.d.) algumas conclusões podem ser feitas a partir da equação geral dos gases. A pressão e o volume são inversamente proporcionais, enquanto pressão e temperatura são diretamente proporcionais da mesma maneira que volume e temperatura.

Para a utilização da equação (9), o gás observado deve apresentar massa fixa e estar nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). Para estas nestas condições, a pressão deve ser de 1 atm, e a temperatura 273 K. É importante utilizar a temperatura na escala Kelvin (FOGAÇA, s.d.).

O conhecimento das três grandezas é extremamente importante, desse modo, serão apresentados resumidamente os conceitos básicos das mesmas.

### 5.2.1 Conceitos básicos sobre pressão

Pressão é uma grandeza física que segundo Júnior (s.d.) é definida como a razão de uma força perpendicular aplicada à uma superfície e a área desta mesma superfície.

Para alguns cálculos, a pressão utilizada deve ser a pressão absoluta. Para a determinação dessa pressão, é necessário conhecer a pressão atmosférica e a pressão manométrica, uma vez que a pressão absoluta é a soma destas duas pressões, conforme equação (10).

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} \quad (10)$$

Onde:

$P_{abs}$  = Pressão absoluta, em Pa

$P_{atm}$  = Pressão atmosférica, em Pa

$P_{man}$  = Pressão manométrica, em Pa

A pressão atmosférica à nível do mar possui o valor de 1 atm, que convertida para bar apresenta o valor de 1,013 bar e sofre variações em função da altitude, tornando-se cada vez menor para altitudes elevadas.

A pressão manométrica por sua vez, é a pressão em que se trabalha o sistema. Dessa maneira se um sistema opera com 6 bar, a pressão absoluta será de 7,013 bar devido à soma da pressão atmosférica.

As unidades mais comuns de pressão são Pascal (Pa) para o sistema internacional, bar para o sistema técnico e libra-força por polegada quadrada (psi) para o sistema inglês.

### 5.2.2 Conceitos básicos sobre temperatura

Temperatura é uma grandeza física escalar que segundo Júnior (s.d) é definida como o grau de agitação das moléculas de um corpo.

A agitação é o efeito cinético do movimento das moléculas que compõem um corpo, ou até mesmo um sistema. A temperatura varia conforme o grau de agitação, quanto maior o grau de agitação maior será a temperatura, e quanto menor o grau de agitação menor será a temperatura. Para a medição da temperatura são utilizados alguns instrumentos, sendo o termômetro o principal (JÚNIOR, s.d.).

Utiliza-se como escala de temperatura, Kelvin (K) para o sistema internacional (temperatura absoluta), Celsius (°C) para o sistema técnico e Fahrenheit (°F) para o sistema inglês. A equação (11) é utilizada para a conversão entre as escalas.



$$\frac{T_C}{5} = \frac{T_K - 273}{5} = \frac{T_F - 32}{9} \quad (11)$$

Onde:

$T_C$  = Temperatura na escala Celsius, em °C

$T_K$  = Temperatura na escala Kelvin, em K

$T_F$  = Temperatura na escala Fahrenheit, em °F

### 5.2.3 Conceitos básicos sobre volume

A definição mais comum acerca de volume, é a quantidade de espaço que um corpo ocupa (SILVA, s.d.). Sua determinação depende muito do estado em que a matéria se encontra podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Estando o corpo em estado sólido existem diversas maneiras de se determinar o volume em função do seu formato, podendo ser uma esfera, um quadrado, um cilindro.

Como este trabalho possui enfoque no ar comprimido, que por sua vez encontra-se no estado gasoso, será enfatizada a determinação de seu volume. Ele apresenta três volumes importantes, o volume de ar livre, volume normal e volume efetivo.

Segundo Rocha e Monteiro (2005), o volume de ar livre só é possível ser determinado se estiver na condição de temperatura 20°C e pressão absoluto 1 bar. Para o cálculo do volume de ar livre pode-se assumir que ele será armazenado em um cilindro, e dessa forma calcular-se o volume pela equação de volume do cilindro, representada na equação (12). É importante salientar que se o recipiente possuir outra forma, outra equação deve ser utilizada.

$$V = \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot h \quad (12)$$

Onde:

$V$  = volume do cilindro, em metro cúbico [m<sup>3</sup>]

$d$  = diâmetro do cilindro, em metro [m]

$h$  = altura do cilindro, em metro [m]

Segundo Rocha e Monteiro (2005), o volume normal, em  $Nm^3$ , é determinado com as seguintes condições: pressão absoluta em 1 bar e temperatura em  $0^\circ C$ , e volume de ar efetivo é determinado nas condições reais de temperatura e pressão em que ocorre a compressão, unidade em  $m^3$ . As unidades para volume no sistema internacional e sistema técnico são iguais, em metros cúbicos ( $m^3$ ), e pés cúbicos ( $ft^3$ ) para o sistema inglês.

#### **5.2.4 Tipos de compressão**

Os conceitos apresentados de pressão, temperatura e volume apesar de breves e pouco aprofundados tornam possível uma explicação simples e objetiva sobre os três tipos de compressão: isovolumétrica, isotérmica e isobárica.

Utilizando apenas três variáveis (volume, pressão e temperatura), a compressão isovolumétrica (ou isocórica) ocorre quando uma determinada massa sofre uma transformação e permanece com o volume constante, sendo a variação de pressão e temperatura diretamente proporcionais, ou seja, em caso de aumento de pressão, a temperatura aumentará na mesma proporção (TOFOLLI, s.d).

Em caso de compressão isotérmica, a massa permanece com temperatura constante e as variáveis pressão e volume são inversamente proporcionais, ou seja, quando aumenta o volume a pressão diminui e vice-versa (TOFOLLI, s.d).

Por fim, na compressão isobárica a massa permanece com pressão constante, e as variáveis temperatura e volume são diretamente proporcionais, portanto, o aumento de uma resultará no aumento da outra (TOFOLLI, s.d).

### **5.3 CUSTO DO AR COMPRIMIDO**

Apesar do custo real do ar comprimido ser uma tarefa complicada se determinar uma vez que não é calculado apenas em função da eletricidade, é possível efetuar uma estimativa relevante em termos de eficiência energética e por esse motivo, Hahn (2004) desconsidera alguns fatores como manutenção e impostos neste cálculo.

Para se determinar o custo específico anual do ar comprimido é necessário a determinação do custo da geração anual, que é a soma dos custos da geração em carga e em vazio, apontados na equação (13).

$$C_t = C_c + C_o \quad (13)$$

Onde:

$C_t$  = Custo anual da geração de ar comprimido, em R\$/a

$C_c$  = Custo anual da geração de ar comprimido com compressor trabalhando em carga, em R\$/a

$C_o$  = Custo anual da geração de ar comprimido com compressor trabalhando em vazio, em R\$/a

Como pode ser observado, é necessário determinar os custos da geração em carga e em vazio por meio das Equações (14) e (15), além de atentar-se ao custo específico da energia elétrica, que é determinada pela concessionária ou qualquer tipo de fornecedor de energia a qual a planta, indústria está vinculada.

$$C_c = \left[ \sum_{i=1}^n (P_{cc_i} \cdot t_{cc_i}) \right] \cdot C_{kWh} \quad (14)$$

Onde:

$n$  = Número de compressores do sistema

$P_{cc}$  = Potência do compressor operando em carga, em kW

$t_{cc}$  = Tempo de funcionamento anual do compressor operando em carga, em h/a

$C_{kWh}$  = Custo específico da energia elétrica, em R\$/kWh

$$C_o = \left[ \sum_{i=1}^n (P_{co_i} \cdot t_{co_i}) \right] \cdot C_{kWh} \quad (15)$$

Onde:

$P_{co}$  = Potência do compressor operando em vazio, em kW

$t_{co}$  = Tempo de funcionamento anual do compressor operando em vazio, em h/a

Com o valor do custo anual da geração do ar comprimido, é possível determinar o valor estimado do custo específico do ar comprimido, usando a equação (16).

$$C_{ar} = \frac{C_t}{60 \cdot [\sum_{i=1}^n (Q_{c_i} \cdot t_{cc_i})]} \quad (16)$$

Onde:

$C_{ar}$  = Custo específico do ar comprimido, em R\$/m<sup>3</sup>

$Q_c$  = Vazão do compressor, em m<sup>3</sup>/s

#### 5.4 GERAÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Um sistema de geração de ar comprimido como observado na Figura 5 é formado por: compressor, separador água/óleo, resfriador, aftercooler, secador, filtro de ar, reservatório de ar e ferramentas pneumáticas que podem conter: filtro, regulador e lubrificador.

O processo de geração se inicia quando o compressor recebe ar atmosférico e realiza a chamada compressão, ou seja, coloca uma pressão no ar maior do que a pressão atmosférica. Porém este ar além de estar com temperatura elevada e possuir impurezas como umidade e poeira, está contaminado com o óleo do compressor (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Em seguida o ar comprimido passa pelo separador água/óleo para que seja retirado o óleo que contém nele e após este processo é levado para ser resfriado pelo aftercooler, que reduz a sua temperatura. O ar pode sair do compressor com temperatura entre 85°C e 180°C, e o aftercooler reduz esta temperatura para 10°C até 15°C acima da temperatura ambiente (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Após ser refrigerado o ar se dirige ao reservatório onde ocorre a condensação de modo a retirar grande parte da umidade do ar, e o condensado é levado ao esgoto. O ar passa ainda por um secador para garantir a máxima retirada da umidade, e estando seco percorre um filtro onde é distribuído para as aplicações (ferramentas pneumáticas), na qual podem ser instalados filtros, reguladores de pressão e lubrificadores dependendo da qualidade de ar necessária no projeto (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Cada sistema possui uma estrutura diferenciada e há vários fatores que a determinam. Tais como:

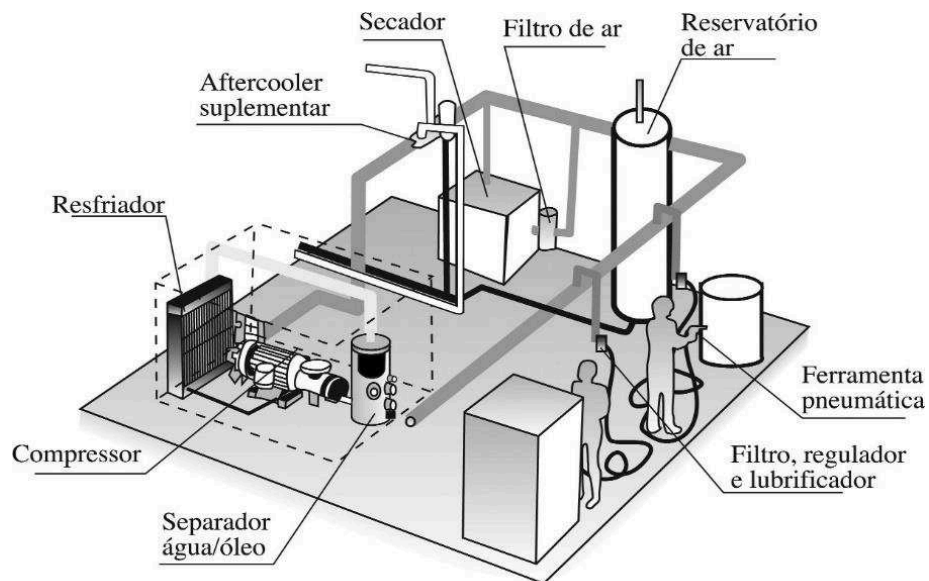
- número de pontos usuários;
- consumo e pressões por aplicação;
- distância entre pontos usuários;
- custos de manutenção;
- custos de paradas não programadas;

- eficiência dos equipamentos;
- disponibilidade de utilidades no leiaute da planta; e
- perfil da carga a ser atendida (ROCHA e MONTEIRO 2005).

Com a análise desses fatores é possível estabelecer se o sistema deve ser centralizado ou descentralizado, de múltiplas ou poucas unidades. O modelo centralizado possui algumas facilidades e por isso é o preferido. Entre as facilidades pode-se destacar: melhor projeto, proteção contra pessoas não autorizadas, economia na operação do sistema, controle da poluição sonora e controle da ventilação (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

“As aberturas para a entrada do ar atmosférico devem ser bem planejadas. Quanto mais ventilado e fresco for o ambiente da sala de compressores, melhor será o rendimento do sistema” (ROCHA e MONTEIRO, 2005, p. 40).

Figura 5 - Visão tridimensional de uma instalação de geração de ar comprimido



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005)

### 5.4.1 Compressores

Os compressores são máquinas que realizam a transformação termodinâmica chamada compressão. Eles são responsáveis por captar o ar com pressão atmosférica, e elevar sua pressão até o valor desejado à sua aplicação (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

É de fundamental importância a seleção dos componentes do sistema de ar comprimido, incluindo a escolha do compressor para produzir ar com pressão adequada à aplicação. O

dimensionamento correto permite o sistema funcionar adequadamente principalmente minimizar as perdas de pressão (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Os compressores mais utilizados nas aplicações de ar comprimido são os de deslocamento positivo ou volumétricos de pistão e os de parafuso. Para sistemas de menores pressões, mas com vazões elevadas são mais utilizados os turbocompressores ou os dinâmicos (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

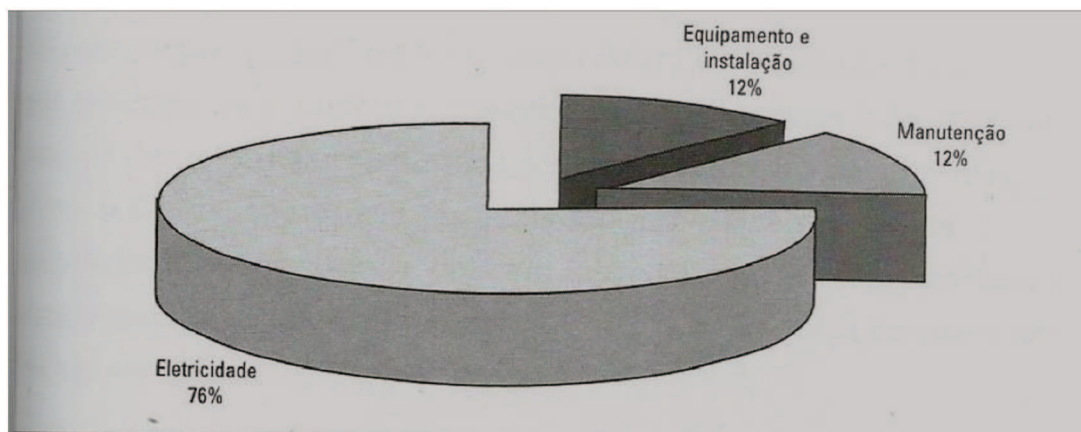
A escolha do tipo de compressor é influenciada por diversos fatores, por isso não pode ser resolvida apenas com cálculos e gráficos (HAHN, 2004).

Fatores como:

- pressão de descarga;
- relação de compressão;
- vazão de ar desejada;
- regime de operação;
- contaminação do ambiente;
- custos de manutenção;
- custo de aquisição;
- consumo específico (HAHN, 2004).

O custo do compressor, como observado na Figura 6, não deve ser o principal fator para sua escolha uma vez que o seu consumo específico ao longo de sua vida útil possui um custo maior. É importante informar-se junto ao fabricante sobre suas características para que o compressor seja adequado à sua aplicação (HAHN 2004).

Figura 6 - Composição de custos durante a vida útil de um compressor

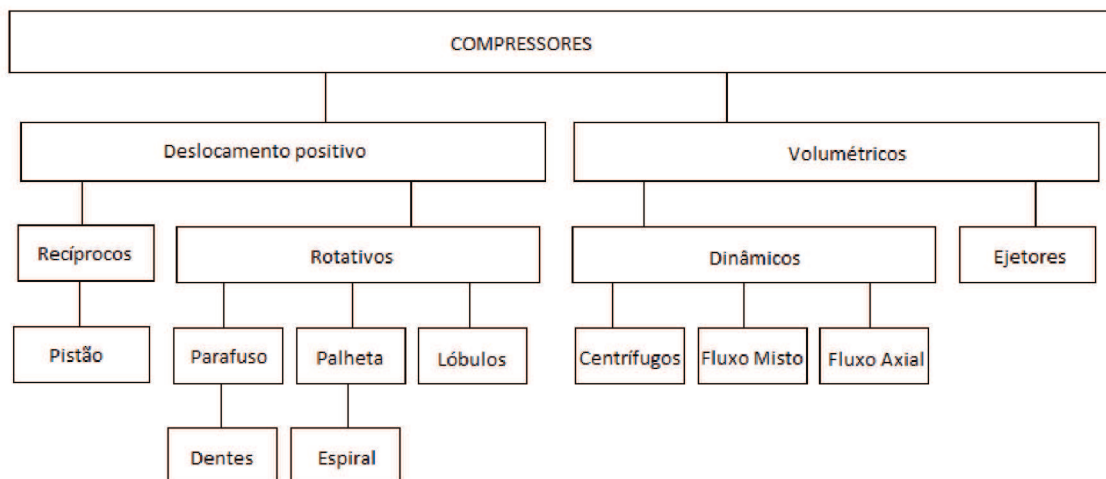


Fonte: (HAHN, 2004).

#### 5.4.1.1 Tipos de compressores

Os principais tipos de compressores são mostrados na Figura 7. Serão concentradas as informações nos modelos mais utilizados nas indústrias, sendo os recíprocos e à parafuso para médio porte e centrífugos para indústrias de grande porte (HAHN, 2004).

Figura 7 - Classificação de compressores

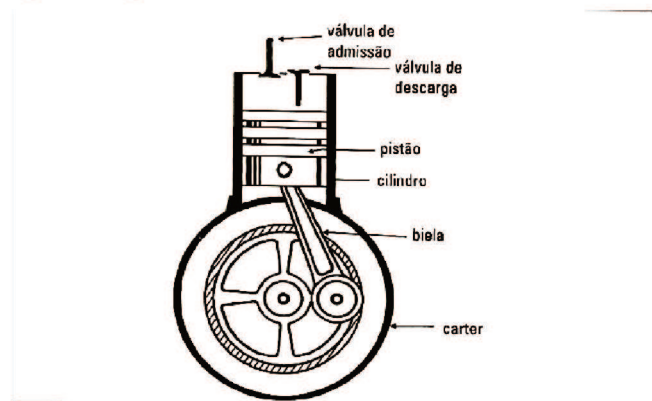


Fonte: (Adaptado de HAHN, 2004).

##### 5.4.1.1.1 Compressores recíprocos

O compressor recíproco mais utilizado é o modelo a pistão, representado na Figura 8. Neste modelo um pistão (êmbolo) se descola e comprime o volume de gás. A vazão fornecida pelos compressores a pistão é entre 3 e 5000  $m_n^3/h$  (HAHN, 2004).

Figura 8 - Corte de um compressor a pistão

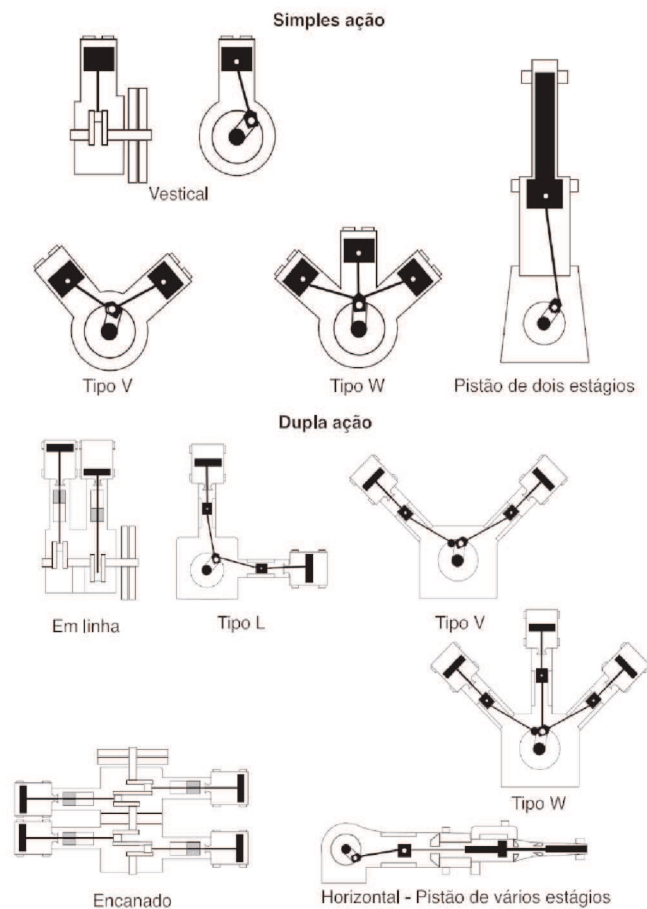


Fonte: (HAHN, 2004).

O funcionamento fundamenta-se na conversão do momento rotativo do motor no movimento linear do pistão através de um sistema biela-manivela e, as válvulas de admissão e descarga de gás são responsáveis por possibilitar a compressão por meio do movimento do pistão. Na admissão do ar, o pistão está na posição recuado (inferior), a válvula de admissão se abre e o ar entra. Durante a compressão, o pistão se movimenta da posição de recuado para avançado, e as válvulas de admissão e de descarga estão fechadas, nessa compressão a pressão do ar torna-se maior do que a pressão atmosférica, o ar se converte em ar comprimido e a válvula de descarga abre para a saída do mesmo. Nesse momento o pistão recua novamente, reiniciando o processo (HAHN, 2004).

Os compressores a pistão podem ser de simples ou de dupla ação, com algumas formas construtivas conforme Figura 9. Os mais utilizados são do tipo V e do tipo L (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Figura 9 - Compressores alternativos de pistão



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).



#### 5.4.1.1.2 Compressores à parafuso

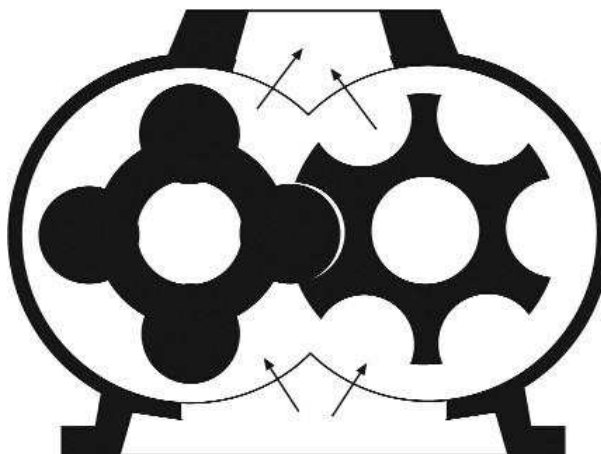
Os compressores à parafuso, Figura 10 são compressores que produzem altas vazões e possuem comportamento estável com variação de carga. Foram desenvolvidos nos anos 30 e são formados por dois rotores em formato de parafuso ligados paralelamente em uma carcaça e interagem. Cada rotor gira em um sentido, ou seja, eles giram em sentido contrário, e possuem velocidades angulares diferentes devido à diferença de filetes nos rotores. As câmaras de compressão se formam a partir da folga entre os dois rotores (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Este modelo fornece um fluxo contínuo e sem pulsações, por conta da diferença de velocidades angulares, pois desta maneira o volume de ar diminui-se continuamente. Os compressores à parafuso podem ser do modelo “normal” ou isentos de óleo (HAHN, 2004).

Os “normais”, ou seja, com injeção de óleo, são capazes de produzir ar com pressões maiores, por isso é necessário o óleo, que serve para lubrificar os parafusos e garantir que eles possam trabalhar em regime pesado, e também para a refrigeração da máquina (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Nos compressores isentos de óleo os filetes não podem se tocar devido à falta de lubrificação e os rotores são sincronizados por meio de engrenagens externas. A relação de compressão por estágio nos isentos de óleo é 1:3, já nos normais é de 1:15 (HAHN, 2004).

Figura 10 - Compressor a parafuso



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

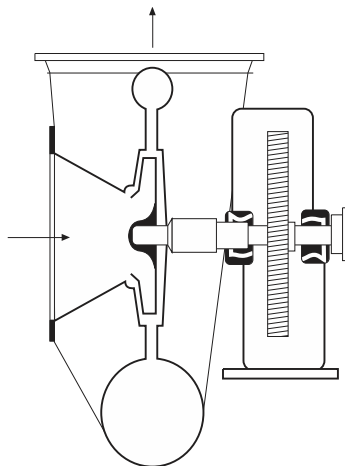
#### 5.4.1.1.3 Compressores centrífugos

São compressores dinâmicos, Figura 11 que trabalham somente em altas vazões, além disso necessitam de condições e cuidados especiais (HAHN, 2004).

“A compressão se dá perpendicularmente ao eixo do motor por meio de rotores que aceleram o gás, o qual é forçado através de difusores (volutas) como nas bombas centrífugas” (HAHN, 2004, p.27).

O processo da compressão se inicia com o ar sendo admitido pelo rotor e deslocado no sentido vertical pela força centrífuga, que acelera o ar, o cedendo energia cinética. Na saída do compressor se localizam difusores, que transforma a energia cinética do ar em energia de pressão. A rotação do rotor é o que gera a força centrífuga (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Figura 11 - Compressor radial centrífugo



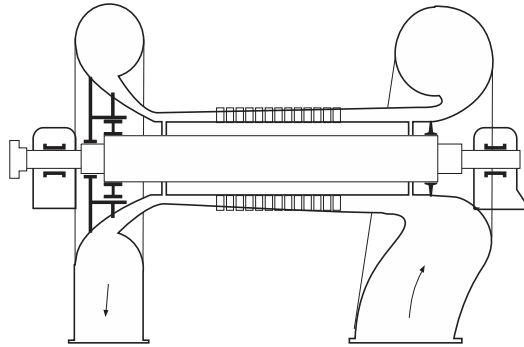
Fonte: (ROCHA e MONTEIRO 2005).

#### 5.4.1.1.4 Compressores axiais

Mostrado na Figura 12, é um compressor de aplicação específica por precisar de vazões elevadas. A compressão ocorre paralelamente ao eixo do motor (HAHN, 2004).

Ele possui pás fixas e pás móveis. As pás móveis são responsáveis por fornecer energia cinética ao ar, e as pás fixas transformam essa energia cinética em energia de pressão. Assim o ar é acelerado e desacelerado durante seu caminho no compressor (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Figura 12 - Compressor axial



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

#### 5.4.2 Reservatório de ar

O reservatório tem a função de suprir as necessidades instantâneas do ar comprimido e também controlar o funcionamento do compressor, visto que cede ar à instalação e determina se o compressor pode ficar desligado ou funcionar continuamente sem quedas bruscas de pressão, que podem afetar o desempenho dos demais equipamentos. Armazenando o ar comprimido é possível compensar variações de consumo e suprir aos picos de demanda. Fatores como a vazão efetiva do compressor, o sistema de controle e o consumo do ar comprimido determinam o volume do reservatório e variam conforme a instalação (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Outra função desempenhada pelo reservatório é a coleta do condensado, ou seja, a umidade em forma de gotas de água. O ar quando é resfriado condensa e a maior parte dele fica retida no reservatório, que tem função de drena-lo para o exterior. Se a drenagem for constante, não é necessária a galvanização das superfícies que ficam em contato com o condensado, mas se o sistema fica muito parado ou não possui drenagem constante é necessária a galvanização para não haver corrosão das superfícies. O reservatório ainda permite atender picos de demanda, o que ocorre principalmente quando o sistema apresenta ferramentas de uso esporádicos de alto consumo, mas por curto período (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

##### 5.4.2.1 Instalação dos reservatórios

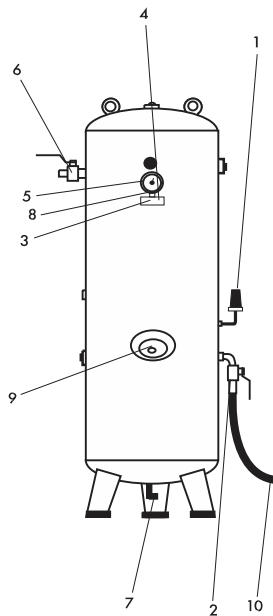
A instalação dos reservatórios deve ser feita de maneira eficiente e levar em consideração fatores que contribuam não só para o funcionamento adequado de toda a instalação mas resultem em economia.

O local da instalação deve ser fresco e permitir que o condensado seja drenado para o reservatório, isso gera economia visto que não serão necessários dispositivos para retirar o condensado ao longo da instalação. O lugar também deve permitir manutenção regular e os reservatórios devem ser montados sobre bases com fundação adequada. Sua instalação ainda deve levar em conta perigo de acidente para pessoas e proteção contra outros equipamentos (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

No âmbito da segurança, como os reservatórios são vasos de pressão devem se dispor às normas dos países onde são fabricados. No Brasil por exemplo, seguem-se as normas de construção e projeto da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), e de segurança a Norma Regulamentadora NR13 (o manuseio por parte dos operadores também se enquadra nessa norma). Ambas devem ser consultadas para cálculos, projetos e construções de reservatórios (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

A Figura 13 apresenta um reservatório de ar comprimido cujas conexões serão descritas posteriormente.

Figura 13 - Reservatório de ar comprimido com as conexões



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Com base na Figura 13 é possível observar que os reservatórios possuem orifícios para conexão de tubulações e instrumentos que o compõem. A descrição da função de cada orifício está descrita abaixo.

1. Pressostato: Controla o funcionamento do compressor.

2. Válvula de retenção: É instalada entre o compressor e o reservatório para evitar que o ar presente no reservatório possa retornar ao compressor.
3. Válvula de segurança: Sua instalação é obrigatória e funciona descarregando pressão do reservatório, quando esta assume valores acima de 10% da máxima pressão de operação do reservatório.
4. Flange de controle: Local onde é instalado um manômetro utilizado em testes de pressão.
5. Manômetro: Instrumento que possibilita a medição da pressão interna.
6. Válvula de bloqueio de esfera: Isola o sistema de tubulações do reservatório.
7. Dreno de condensado: Extremamente importante, pois drena o condensado presente no reservatório.
8. Base para conexões: Parte onde podem ser instalados acessórios ou válvulas,
9. Abertura de inspeção: Permite a inspeção da limpeza e do interior do reservatório e
10. Mangueira flexível de alta pressão: Faz a conexão entre o compressor e o reservatório e tem a função de eliminar vibrações no reservatório provenientes do compressor (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

#### 5.4.2.2 Cálculo do volume do reservatório

A capacidade mínima do reservatório deve atender toda a demanda do sistema. Além do consumo regular, o reservatório deve ainda ser projetado para suprir as cargas especiais de elevado consumo em curto período. O cálculo do volume do reservatório pode ser feito através das Equações (17,) (18) e (19).

$$V_R = \frac{Q \cdot t}{\Delta P} \quad (17)$$

Onde:

$V_R$  = Volume do reservatório de ar comprimido, em  $m^3$

$Q$  = Demanda do sistema, em  $m^3/\text{min}$

$t$  = Tempo que o reservatório é capaz de fornecer ar comprimido sem quedas excessivas de pressão, em min

$\Delta P$  = Diferença de pressão inicial e final do reservatório, em bar

$$VR = \frac{DLE \cdot F}{T_c \cdot \Delta P} \quad (18)$$

Onde:

DLE = Vazão dos compressores, em m<sup>3</sup>/min

F = Constante, 5 para compressores de parafuso e 15 para compressores a pistão

T<sub>c</sub> = Taxa de ciclos seguidos do motor, em 1/h

$$VR = \frac{DLE \cdot 60 \cdot \left[ \frac{Q}{DLE} - \left( \frac{Q}{DLE} \right)^2 \right]}{T_c \cdot (P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n})} \quad (19)$$

Onde:

P<sub>máx</sub> = Pressão de desligamento do compressor, em bar

P<sub>mín</sub> = Pressão de religamento do compressor, em bar

Sistemas que são compostos por compressores à pistão, devem possuir reservatórios maiores devido aos pulsos de ar gerados pelo compressor. Menor será o reservatório quanto maior for a diferença de pressão permitida. Por esse motivo, o volume do reservatório pode ser aumentado ou a diferença de pressão deve ser aumentada para economizar energia (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

## 5.5 TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Os equipamentos necessitam do ar comprimido livre de impurezas e seco, ou seja, isento de partículas sólidas e de água, para um funcionamento adequado e com qualidade elevada. Por esse motivo seu tratamento é extremamente importante (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O tratamento do ar comprimido traz muitos benefícios, são eles: aumento da vida útil dos equipamentos; produto final de melhor qualidade; tubulações pneumáticas sem condensado e sujeiras; redução dos problemas mecânicos com a redução da sujeira; redução de gastos com a compra de componentes para retirar o condensado; redução de manutenção corretiva e ganho de tempo de produtividade; diminuição de perda de pressão e conseqüente redução de consumo de energia. De outro modo, o tratamento ineficiente traz diversas conseqüências ocasionadas por diferentes impurezas (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Segundo Rocha e Monteiro (2005), a presença de impurezas como partículas sólidas no ar promove o desgaste no sistema pneumático por causar arranhões nas superfícies metálicas. O óleo por sua vez quando acumulado, faz com que se reduza o diâmetro dos tubos dificultando a passagem de ar.

Outra substância que é extremamente prejudicial por ser capaz não só de corroer a tubulação e congelar no período de frio, é a água. E esta pode ainda impedir ou atrapalhar a presença do ar comprimido e promover a necessidade de manutenção do sistema (ROLLINS, 2004).

### 5.5.1 Qualidade do ar comprimido

Devido à necessidade de se classificar a qualidade do ar comprimido, a ISO (International Organization of Standardization) elaborou a ISO 8573-1 que define um padrão de classes para determinadas aplicações, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes de qualidade de ar comprimido segundo a ISO 8573-1:2010

ISO 8573-1:2010	Partículas sólidas			Água		Óleo	
	Número máximo de partículas por m <sup>3</sup>			Concentração de massa	Ponto de orvalho da pressão Vapor	Líquida	Conteúdo total de óleo (líquido, aerossol e vapor)
Classe	0,1 – 0,5 µm	0,5 – 1 µm	1 – 5 µm	mg/m <sup>3</sup>	°C	g/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
0	Conforme determinado pelo usuário do equipamento, exigências maiores do que a Classe B141						
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	-	≤ -70	-	0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	-	≤ -40	-	0,1
3	-	≤ 90.000	≤ 1.000	-	≤ -20	-	1
4	-	-	≤ 10.000	-	≤ +3	-	5
5	-	-	≤ 100.000	-	≤ +7	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ +10	-	-
7	-	-	-	5 – 10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5 – 5	-
9	-	-	-	-	-	5 – 10	-
x	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

Fonte: (FESTO, 2015).

É necessário atender as classes dos parâmetros referentes às partículas sólidas, água e óleo, para se tornar possível o tratamento do ar comprimido em conformidade com as normas para soluções de automação (FESTO, 2015).

### 5.5.2 Secagem do ar comprimido

O processo de secagem do ar comprimido é indispensável pois é nele em que a água presente no ar é retirada. Tendo em vista que a ausência de água aumenta a durabilidade dos equipamentos e tubulações por não acontecer a corrosão, a qualidade do produto final é ampliada (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O processo de secagem se inicia no aftercooler, que possibilita a precipitação primária do condensado ao resfriar o ar comprimido por meio de troca de calor. Cerca de 80-90% do condensado deve ser precipitado pelo aftercooler evitando a presença de água nas tubulações que, assim como o ar, pode ser utilizada posteriormente para o resfriamento (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

#### 5.5.2.1 Secagem por resfriamento

O processo de secagem por resfriamento consiste em resfriar o ar comprimido até o ponto de orvalho do vapor d'água, por meio da troca de calor que constantemente é feita a partir de um líquido refrigerante. O condensado resultante precisa ser drenado (ROLLINS, 2004).

Conforme o ar é resfriado e absorve umidade, o condensado é retirado. O Ponto de orvalho é determinado pela temperatura mais baixa, e mantido em torno de 2 a 3°C do ponto de orvalho de pressão. Por este motivo não consegue atingir um ponto de orvalho muito baixo, pois pode começar a congelar a água (ROLLINS, 2004).

Este processo apresenta algumas vantagens como: manter um ponto de orvalho constante, necessitar de pouca manutenção e baixo custo de operação. Porém apresenta a desvantagem de não conseguir diminuir o ponto de orvalho (ROLLINS, 2004).

#### 5.5.2.2 Secagem por absorção

A secagem por absorção emprega materiais dessecantes para absorver a umidade, atingindo baixos pontos de orvalho. Para que o processo seja contínuo são necessários no mínimo duas torres com o material, dado que o material dessecante é regenerativo, ou seja, ao ser aplicado calor a umidade que ele absorveu é retirada, ele pode ser usado para o processo de secagem onde uma torre realiza a secagem enquanto a outra está sendo regenerada. Esse



material perde seu efeito para a secagem se for coberto por óleo, e dessa forma é importante a instalação de um filtro para a retirada do óleo antes das torres (ROLLINS, 2004).

Este tipo de secagem apresenta de modo geral a vantagem de não drenar a água, visto que ela é absorvida pelo material, porém necessita de constante manutenção que pode interferir na estimativa de custo inicial do sistema (ROLLINS, 2004).

### 5.5.2.3 Secagem por adsorção

A secagem por adsorção é realizada por meio de um material físico que adsorve a água presente no ar a medida em que passa pelo dessecante.

“Adsorção é um processo que consiste em condensar e segurar a umidade sobre a superfície de uma área porosa de determinada substância higroscópica” (ROLLINS, 2004, p.440).

De maneira semelhante esse material higroscópico é colocado comumente em duas torres, mas permite apenas a utilização de uma torre, com a substituição do material que pode ser regenerado por meio de calor. O material higroscópico mais utilizado é a sílica gel, que é composta de silicato de sódio e ácido sulfúrico, apresenta grande capacidade de adsorção da água, e facilmente reativada com calor (ROLLINS, 2004).

O ponto de orvalho por meio deste processo alcança baixos índices de maneira limitada, e tem uma manutenção cara (ROLLINS, 2004).

### 5.5.3 Filtragem do ar comprimido

O processo de filtragem tem por objetivo a retirada de partículas sólidas, óleo e até mesmo água presentes no ar comprimido, no entanto ele não é capaz de eliminar o vapor d'água. Desta maneira, torna-se igualmente indispensável para o tratamento do ar, trazendo vantagens aos equipamentos, utilizando filtros coalescentes para purificação do ar.

A seleção adequada do filtro leva em consideração quatro fatores sendo o primeiro destes fatores a capacidade de separação do filtro (sua eficiência), que é a indicação da quantidade de partículas antes e depois do filtro. O filtro deve especificar também o tamanho mínimo das impurezas que ele é capaz de eliminar. O segundo fator é a concentração de partículas, que é a relação entre o peso das partículas e o volume de ar comprimido. O terceiro fator é a queda de pressão ou seja, a diferença ( $\Delta P$ ) medida antes e posterior ao filtro, que varia entre 0,02 bar e

0,2 bar para filtros novos. O quarto e último fator é o volume de fluxo, que usa a pressão básica ( $P_B=7$  bar) como referência para a determinação do fluxo do filtro (BOSCH, 2008).

A conversão do volume de fluxo é dada pelo fator de correção  $f$ , representado na equação (20).

$$f = \frac{P}{P_b} \quad (20)$$

Onde:

Fator  $f$  = fator de correção

$P$  = Pressão absoluta utilizada no filtro

$P_b$  = Pressão absoluta básica (7 bar)

A eficiência do filtro é dada pela equação (21).

$$\eta (\%) = 100 - \frac{C_2}{C_1} \cdot 100 \quad (21)$$

Onde:

$\eta$  = Eficiência do filtro, em %

$C_2$  = Concentração de partículas após o filtro

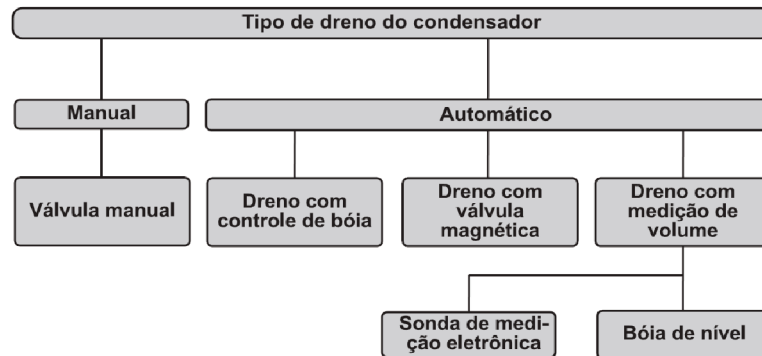
$C_1$  = Concentração de partículas antes do filtro

#### 5.5.4 Drenagem do condensado

Segundo Rocha e Monteiro (2005) quando há presença de condensado no sistema de ar comprimido ele deve ser drenado para evitar danos ao sistema, como corrosão de metais, além de que o acúmulo de condensado nas tubulações podem dificultar a passagem do ar comprimido, aumentando sua perda.

Os principais tipos de drenos utilizados conforme a Figura 14 são manuais ou automáticos, sendo cada um indicado para determinado tipo de condensado e determinado tipo de sistema.

Figura 14 – Tipos de dreno de condensado



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Para a seleção da drenagem a ser utilizada no sistema é necessário definir o tipo de condensado (agressivo ou pastoso) e como ele se forma no sistema. Outros parâmetros também são importantes para a seleção, como a área em que o condensado se encontra, pois em determinadas ocasiões essas áreas podem correr riscos de explosão, e por último a pressão em que ele se forma (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

## 5.6 PROJETO EFICIENTE DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Vários critérios devem ser estudados para o projeto de um sistema de ar comprimido, e sua eficiência está ligada à capacidade do sistema em fornecer o ar comprimido com qualidade para as aplicações com a menor perda possível. Sendo o principal objetivo desse sistema fornecer com quantidade, qualidade e pressão adequada ar comprimido para vários pontos de aplicação, possibilitando uma operação eficiente principalmente de ferramentas pneumáticas (ROLLINS, 2004).

Para início de um projeto deve-se determinar qual a aplicação do ar, visto que cada equipamento possui um consumo específico, e por meio deste é possível determinar a pressão necessária, o compressor, o reservatório, e os demais componentes do sistema, sendo o consumo das diferentes ferramentas é apresentado na Tabela 3, com medidas em pés cúbicos por minuto e em litros por segundo.

Também deverão ser estudados ao longo do projeto os pontos de possível ampliação do sistema.

Tabela 3 - Consumo de ar comprimido de diferentes ferramentas

Ferramentas	Ar efetivo, a 6,5 bar, fator de carga 100%	
	pcm	l/s
Esmerilhadeiras, rebolos 6" e 8"	50	23
Esmerilhadeiras, rebolos 2" e 2,5"	14 – 20	6 – 9
Esmerilhadeiras de ferramentaria	18	8
Lixadeiras rotativas, 9"	53	24
Lixadeiras rotativas, 7"	30	14
<b>Socadores</b>		
Cilindro 1" x 4"	25	12
Cilindro 1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> " x 4"	28	13
Cilindro 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " x 6"	39	18
Rebarbadores, peso 4,5 – 6 kg	28 – 30	13 – 15
Pesado	39	18
peso 1 – 2 kg	12	6
Apertadeiras de porcas 10 mm, peso 3,5 kg	20	9
Apertadeiras de porcas 12 – 19 mm, peso 8 kg	30	14
Bombas de água portáteis 550 l (recalque de 15 m)	70	32
Pistola de pintura, média	7	4
Vários tipos	2 – 20	1 – 9
Ferramentas para esculpir (monumentos)	10 – 15	5 – 7
Furadeiras de alvenaria	40 – 50	18 – 23
Rebitadeiras	12	6
maiores pesando 8 – 10 kg	35	16
Furadeiras para madeira até 1", peso 2 kg	40	18
diâmetro 2", peso 10 kg	80	36
Furadeiras para aço, motores rotativos		
capacidade de até 6 mm	18 – 20	8 – 10
capacidade de até 6 – 10 mm	20 – 40	9 – 18
capacidade de até 12 – 19 mm	70	32
capacidade de até 22 – 25 mm	80	36
capacidade de até 30 mm	95	43
Furadeiras para aço, motores de pistão		
capacidade de até 12 – 19 mm	45	21
capacidade de até 22 – 30 mm	75 – 80	34 – 37
capacidade de até 30 – 50 mm	80 – 90	37 – 40
capacidade de até 50 – 75 mm	100 – 110	45 – 50

Fonte: (ROLLINS, 2004).

### 5.6.1 Pressão de trabalho

A determinação da pressão de trabalho é um ponto crucial para o projeto do sistema, e esta deverá atender as aplicações do sistema, seus equipamentos consumidores e também as perdas entre geração e consumo. A pressão determinada deverá ser a mínima que consiga atender aos requisitos de quantidade e qualidade dos equipamentos consumidores, vencer todos os obstáculos do fluxo do ar pelas tubulações, além de atentar-se quanto as perdas de pressão na carga (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O somatório da máxima pressão dos equipamentos mais as perdas entre os equipamentos e o compressor, incluindo acessórios, definem a pressão de ajuste dos compressores (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Essa pressão é indicada na equação (22).

$$P = \text{máximo} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i + \Delta P_i) \right] \quad (22)$$

Onde:

$P$  = Pressão de ajuste dos compressores;

$P_i$  = Pressão de cada equipamento;

$\Delta P_i$  = Perda de pressão entre um equipamento e o compressor.

A pressão de trabalho comumente sofre variações, e estas devem ser controladas com a finalidade de respeitar as especificações dos fabricantes dos equipamentos consumidores, garantindo seu funcionamento eficiente.

Segundo Rocha e Monteiro (2005), as aplicações podem possuir pressão de trabalho diferentes em um mesmo sistema, e neste caso é necessário um estudo mais complexo para alcançar a sua viabilidade econômica. Em determinadas ocasiões a melhor solução é separar a rede e instalar compressores menores para atender estas cargas especiais, que são os equipamentos que consomem ar comprimido em menor quantia, mas necessitam de uma pressão de trabalho maior. Deste modo, aumentar a pressão de trabalho é na verdade uma solução de baixa viabilidade econômica.

### 5.6.2 Determinação da capacidade necessária do compressor

A vazão de ar comprimido a ser produzido pelo sistema é extremamente dependente do consumo das cargas. Devem ser levadas em conta também as perdas por vazamentos em todo o sistema considerando futuras expansões. Desse modo, a determinação da capacidade correta do compressor é muito importante e para seu estabelecimento é necessário um estudo do comportamento das cargas. Muitas cargas podem operar de modo contínuo enquanto outras podem ser usadas esporadicamente, dessa maneira é levado em conta o consumo médio de cada carga, que é determinado empregando o seu fator de utilização (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O fator de utilização indica o perfil de consumo de um equipamento em função do tempo de funcionamento em um determinado período. Conhecendo este perfil, é possível determinar a capacidade necessária do compressor (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O período considerado para o fator pode ser um dia, um mês ou um ano. Comumente se utiliza o mês para efetuar os cálculos. A Tabela 4 disponibiliza exemplos sobre consumo DPL e fator de utilização de alguns equipamentos específicos.

Por meio da equação (23) é possível determinar de maneira mensal o fator de utilização de um determinado equipamento, ou até mesmo da planta (sistema). Para tanto, é importante conhecer o regime de trabalho da planta (horas por dia trabalhada e dias por mês), para que o cálculo possa ser o mais preciso possível e possibilitando estudos de futuras expansões.

$$F_u = \frac{t_c(\text{mês})}{h(\text{mês})} \quad (23)$$

Onde:

$F_u$  = Fator de utilização

$t_c$  = Tempo em carga ao longo do mês, em h

$h$  = Horas por mês, em h

Tabela 4 - Exemplo de consumo e fator de utilização

Equipamento Consumidor	Consumo DLP- m <sup>3</sup> /min	Fator de utilização
Furadeiras	0,33 a 3,40	0,20 a 0,05
Rosqueadeiras	0,45	0,05
Aparafusadeiras	0,90	0,20
Esmerilhadeiras	1,50 a 2,50	0,30 a 0,20
Bicos de Limpeza	0,50	0,30
Rebitadores	1,10 a 1,30	0,20 a 0,30
Rebarbadores	0,37 a 0,73	0,05 a 0,10
Unidade de jato de areia	1,55	0,20
Pistolas de pintura	0,25	0,50

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Compreendendo as características das cargas da planta e seu fator de utilização, torna-se importante conhecer o fator de coincidência dos equipamentos, sendo este a simultaneidade em que os equipamentos são utilizados. Estes são utilizados para estudar os regimes de operação de uma planta em um dia, determinando dessa maneira os períodos e vazão em que operam, podendo ser máxima ou apenas uma parte, com esse estudo é possível determinar ações para economia de energia.

“O perfil da carga e suas variações ao longo do tempo indicarão a necessidade de compressores de portes diferentes, a quantidade deles, a correta localização e a adequada capacidade dos reservatórios” (ROCHA e MONTEIRO, 2005, p.100).

A vazão produzida pelo sistema deve obedecer a equação (24), considerando perdas por vazamentos e espaço para futuras expansões.

$$Q_{\text{sistema}} = Q_{\text{máximo}} \cdot mv \cdot me \quad (24)$$

Onde:

$Q_{\text{sistema}}$  = Vazão do sistema

$Q_{\text{máximo}}$  = Vazão no período de maior consumo

$mv$  = margem para vazamentos

$me$  = margem para futuras expansões

É importante estabelecer a margem de vazamentos em 10% do consumo estimado, mesmo que ele represente as perdas e que estime a sua redução no estudo de eficiência energética. Segundo Rollins (2004), deve-se estimar que o ar comprimido pode ser utilizado para aplicações que não foram previstas inicialmente, mas que podem ser lucrativas, e também deve ser estudada a expansão da planta considerando os 10% já mencionado. Estas considerações são levadas em conta antes de selecionar a capacidade final do compressor.

A Tabela 5 mostra como se determina o tamanho do compressor. O valor da vazão m<sup>3</sup>/h é metro cúbico de ar livre por hora, e o tamanho do compressor a ser utilizado é determinado pelo total da coluna (E).

Outro fator que influencia no tamanho do compressor é a maneira que o sistema é instalado, dependendo do layout da planta. Existem várias possibilidades para a instalação, podendo ser centralizado com um compressor grande e um sistema de distribuição para levar o ar comprimido à planta, ou pode ser formado por compressores menores que são distribuídos pela planta, sem ser interconectados, alimentando apenas cargas individuais (ROLLINS, 2004). Cada sistema tem pontos positivos e pontos negativos, conforme discutidos a seguir.

Tabela 5 – Como determinar o tamanho do compressor

Tipo de ferramenta	Localização	Quantidade de ferramentas (A)	Fator de carga(% do tempo de uso real das ferramentas) (B)	m <sup>3</sup> /h necessário		
				Por ferramenta em operação (C)	Total com todas as ferramentas em uso simultâneo (D)	Total realmente usado (AxBxC/100) (E)
Bicos de limpeza, mandris e morsas mecânicas	Oficina					42
Esmerilhadeiras 8"	Limpeza	10	50	85	850	425
Rebarbadores	Limpeza	10	50	51	510	255
Talhas	Limpeza	2	10	60	120	12
Pequenas Parafusadeiras	Montagem	20	25	20	400	100
Apertadeiras de porcas	Montagem	2	25	51	102	25
Furadeiras para madeira	Expedição	1	25	51	51	8
Parafusadeiras	Expedição	1	20	51	51	6
Talhas	Expedição	1	20	40	40	10
<b>Total</b>		<b>47</b>			<b>2124</b>	<b>883</b>

Fonte:( (ROLLINS, 2004).



### **5.6.3 Sistema centralizado e descentralizado**

O sistema centralizado deve ser instalado em local adequado, onde o compressor esteja protegido de sujeira, e possa captar ar fresco e limpo para o processo de compressão. Sua boa localização deve ainda possibilitar a manutenção facilmente (ROLLINS, 2004).

Segundo Rocha e Monteiro (2005), a instalação centralizada pode ser mais viável economicamente com os compressores sendo interconectados e consumindo menos energia. Outra vantagem é o controle fácil dos ruídos, e a necessidade de um número menor de instrumentos de monitoração.

O baixo custo de manutenção e o requerimento de uma área menor para sua instalação também é um atrativo. Apresenta ainda otimização de operação quando formado por compressores de diferentes capacidades, além da melhoria no dimensionamento de filtros, resfriadores e demais acessórios (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O sistema descentralizado com múltiplos compressores tem como sua principal vantagem a flexibilidade. Deve-se atentar também em não instalar os compressores em lugares obscuros, mas em locais que facilitem a manutenção (ROLLINS, 2004).

Este sistema, contudo, apresenta a desvantagem da dificuldade em manter reservas necessárias, além de regular o suprimento de ar do compressor para manutenção. Mas por outro lado apresenta a vantagem de suprir as aplicações distantes da geração, que teriam altas perdas, e também em atender cargas especiais esporádicas (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Para várias plantas, a junção destes dois tipos de sistemas tem se mostrado eficiente, com um sistema centralizado para as cargas regulares, e para as cargas esporádicas de alto consumo são instalados sistemas descentralizados, cada com seu compressor. Este tipo de junção tem mostrado benefícios como menores perdas por vazamento, além de possibilitar expansões. A escolha do tipo do compressor é fundamental para o sistema, conforme detalhado no item 5.4 deste trabalho, da mesma maneira o dimensionamento do reservatório de ar e sua localização, detalhados no capítulo 5 desde trabalho

### **5.6.4 Sistema de distribuição**

Segundo Rollins (2004), toda queda de tensão entre a geração do ar comprimido e seu ponto de uso é um desperdício, por isso o sistema de distribuição é extremamente importante e deve ser bem dimensionado, respeitando as regras descritas a seguir.

A primeira regra se refere à queda de pressão entre o reservatório e o ponto de uso, que não deve ultrapassar 10% da pressão inicial, para isso deve-se dimensionar as tubulações com grandes dimensões. Na segunda regra, se possível utilizar uma rede de distribuição fechada em volta da industrial e em cada prédio, permitindo fluxo em mais de uma direção. Nesse caso as tubulações devem ser projetadas com o objetivo de evitar quedas elevadas da pressão em qualquer ponto de uso vindo por qualquer direção.

A terceira regra, se faz necessária a utilização de reservatórios amplos para tubulações longas, sendo estes localizados nos pontos mais distantes ou próximo a um ponto de consumo especial (elevado consumo em curto período).

A quarta regra se refere à aplicação de mangueiras curtas para evitar elevadas quedas de pressão nas mesmas. Para tornar-se possível a utilização destas mangueiras, os tubos de saída devem chegar o mais próximo possível do ponto de uso, e deve-se conectar os tubos de saída com a tubulação principal pelo lado superior para evitar condensado nas ferramentas.

A quinta ocupa-se em dimensionar as tubulações de modo que todas tenham uma inclinação para a coleta de condensado, com a observação que esta inclinação não pode ser voltada ao compressor, e a última é específica para sistemas com compressores isentos de óleo, no qual recomenda-se a utilização de tubos que possuem resistência à corrosão (ROLLINS, 2004).

Segundo Rocha e Monteiro (2005), para o planejamento do sistema de distribuição é importante identificar e localizar cada ponto de consumo da planta, processo que também facilitará a determinação da sala dos compressores, e além de as tubulações serem preferencialmente de aço ou alumínio, as válvulas devem possuir diâmetro suficiente para amezinhar perdas de pressão.

#### 5.6.4.1 Dimensionamento das tubulações das redes de distribuição

Para o projeto das redes de distribuição, segundo Rocha e Monteiro (2005) algumas recomendações de engenheiros devem ser seguidas para determinar o diâmetro mínimo das tubulações. Estas são citadas nos próximos dois parágrafos.

Os valores de perda a serem adotados são: 0,3 bar para o ponto de consumo mais afastado da geração. 0,02 bar para cada 100 metros nas tubulações principais, e para as secundárias 0,08 a cada 100 metros. Para tubulações de serviço 0,2 bar para cada 100 metros, e para mangueiras 0,4 bar para cada 100 metros.

Para velocidades devem ser adotados valores de 6 a 8 m/s para as tubulações principais, de 8 a 10 m/s para tubulações secundárias. E por fim para mangueiras de 15 a 30 m/s (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

A necessidade de purgadores, para separar a água em locais específicos pode ser eliminada com o tratamento adequado do ar. Caso haja a necessidade de utilizar purgadores, segundo Hahn (2004), eles devem ser mantidos constantes para não haver acúmulo de água, em caso de posição fechada, e perda de ar comprimido em caso de posição aberta.

O diâmetro mínimo das tubulações é calculado por meio da equação (25), e as perdas admissíveis através da equação (26).

$$d = \left[ \frac{0,842 \cdot L \cdot Q^2}{R \cdot \Delta P} \right]^{(1/5)} \quad (25)$$

Onde:

d = Diâmetro interno em cm;

L = Comprimento real = comprimento reto + perdas, em m;

Q = Vazão de ar livre padrão (DLP), em m<sup>3</sup>/min;

R = Pressão do ar final + 1;

$\Delta P$  = Perda de carga permitida, em bar.

$$\Delta P = \frac{3,25 \cdot Q^2 \cdot L \cdot \alpha \cdot \delta}{d^5} \quad (26)$$

Onde:

$\Delta P$  = Perda de carga permitida, em kgf/m<sup>2</sup>;

Q = DLE - vazão que realmente passa pelo tubo nas condições de produção (m<sup>3</sup>/s);

L = Comprimento real da tubulação (tubos + válvulas e conexões);

$\delta$  = Peso específico do ar de acordo com a temperatura, kg/m<sup>3</sup>;

$\alpha$  = coeficiente que deve ser calculado pela equação (27);

d = Diâmetro interno do tubo, em m.

O coeficiente  $\alpha$  é dado por meio da equação (27).

$$\alpha = \frac{0,000507 + 0,00001294}{d} \quad (27)$$

## 5.7 MEDIDAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

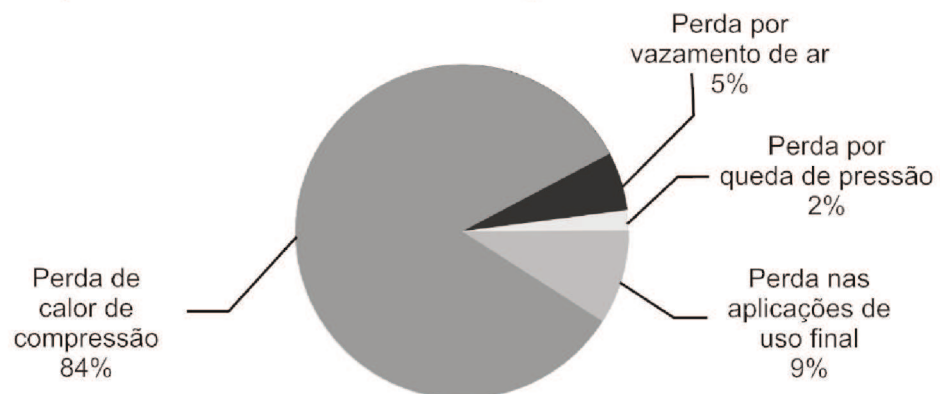
A eficiência energética em sistemas de ar comprimido tem como objetivo evitar o desperdício e perdas de ar comprimido, que resultam na perda de energia elétrica. Para se adotar medidas a fim de alcançar uma boa eficiência energética é importante realizar um estudo detalhado do sistema como um todo. A Figura 15 mostra um diagrama com as principais perdas em um sistema de ar comprimido. É importante também a análise dos componentes, do layout da empresa, dos sistemas de geração, distribuição e consumo.

Os sistemas de geração, distribuição e consumo comumente possuem perdas. O sistema de geração pode ter perdas por baixa eficiência do compressor, por alto consumo específico ou mesmo por superdimensionamento do compressor.

Nos sistemas de distribuição podem ocorrer vazamentos ou perda de carga e nos sistemas de consumo podem haver vazamentos ou até mesmo pressões maiores do que o necessário para as cargas.

São possíveis medidas para reduzir a perda e aumentar a eficiência nesses sistemas, se atentar aos equipamentos, como compressores, que podem estar superdimensionados ou mesmo ultrapassados e devem ser trocados por mais modernos e com maior rendimento.

Figura 15 - Diagrama de perdas características de sistemas de ar comprimido



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, s.d.).

Segundo Rocha e Monteiro (2005) para desenvolver o estudo visando uma maior eficiência energética, pode-se levar como base a realização de oito etapas, que são utilizados por empresas especializadas em sistemas de ar comprimido eficientes.

A primeira etapa a ser realizada é desenvolvimento do diagrama de blocos do sistema de ar comprimido.

A segunda etapa consiste na criação de um perfil de pressões para o sistema. Um estudo mais complexo nessa etapa é muito importante, pois conhecendo exatamente suas cargas é possível determinar qual a qualidade necessária do ar comprimido e assim saber qual tratamento ele deve receber. Esse estudo também possibilita verificar se há a possibilidade da redução de pressão e de consumo das cargas.

A terceira etapa visa a manutenção do sistema, onde deve ser desenvolvido um plano de manutenção juntamente com medidas para facilitar e tornar a etapa eficaz.

A quarta etapa fundamenta-se em analisar se é possível efetuar melhorias no sistema de controle. A quinta e a sexta etapa compõem-se do balanceamento da produção de ar comprimido com seu consumo, de modo que a quinta é o balanceamento em si, e a sexta é a ação de estudar e colocar em prática medidas para manter o balanceamento.

A sétima etapa deve ser realizada juntamente com a gerência de produção da planta onde está sendo realizado o estudo. Dessa maneira é possível definir metas, realizar estudos de custo/benefício e retorno do investimento. Também é importante apresentar medições antes das implementações e após as mesmas, para comprovar os resultados alcançados.

A oitava etapa é fundamental para tornar-se possível todo o estudo. Realizar medições sobre vazão, temperatura, pressão, potência, energia consumida e custos reais do sistema de ar comprimido (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

### **5.7.1 Medidas de eficiência energética em um sistema genérico**

Segundo Rocha e Monteiro (s.d.) com inúmeros estudos de caso para aumentar a eficiência energética em sistemas de ar comprimido, notou-se que algumas medidas são aplicáveis em diversos sistemas. No caso dos sistemas conhecidos como genéricos ou comuns, a aplicação deve aumentar a sua eficiência.

Para medidas referentes à um sistema específico é necessário um estudo mais complexo de suas características particulares, cargas, pressão, temperatura, consumo, entre outras.

Também neste caso é indispensável realizar um estudo econômico para confirmar a sua rentabilidade e custo benefício.

A Tabela 6 aponta as medidas mais aplicadas nos sistemas de ar comprimido utilizadas em um sistema genérico, sendo a coluna Aplicabilidade responsável por apresentar a frequência da aplicação, enquanto a coluna Ganhos representa a redução anual de consumo de energia, e a coluna Potencial de Contribuição o produto destas duas colunas (ROCHA e MONTEIRO, s.d.

Tabela 6 – Oportunidades de melhoria de eficiência energética

<b>Medidas de economia de energia</b>	<b>Aplicabilidade</b>	<b>Ganhos</b>	<b>Potencial de Contribuição</b>
<b>Instalação ou renovação do sistema</b>			
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25 %	2 %	0,5 %
Melhoria dos acionamentos (Reguladores de velocidade)	25 %	15 %	3,8 %
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30 %	7 %	2,1 %
Uso de sistema de controle sofisticado	20 %	12 %	2,4 %
Recuperação de calor rejeitado para uso em outras funções	20 %	20 %	4,0 %
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	10 %	5 %	0,5 %
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50 %	9 %	4,5 %
Redução na perda por queda de pressão	50 %	3 %	1,5 %
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	5 %	40 %	2,0 %
<b>Manutenção e operação do sistema</b>			
Redução de vazamentos de ar	80 %	20 %	16 %
Substituição de filtros mais frequente	40 %	2 %	0,8 %
<b>TOTAL</b>			<b>32,9 %</b>

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, s.d.).

### 5.7.2 Medidas de eficiência energética em um sistema específico

Conforme mencionado no item anterior, para serem adotadas as medidas em prol de maior eficiência energética, maior rendimento e maior economia, para um sistema de ar comprimido específico, é necessário um estudo mais complexo de determinados parâmetros. Desse modo,

nesse trabalho serão apresentadas algumas medidas que podem ser empregadas em sistemas de ar comprimido genérico e específicos. Atenta-se que as medidas aqui apresentadas não são as únicas possíveis, existem outras disponíveis e muitas ainda à serem desenvolvidas.

#### 5.7.2.1 Dimensionamento correto do compressor

O compressor é o equipamento principal do sistema de ar comprimido, e seu dimensionamento pode determinar se uma instalação será eficiente ou não. Os fatores que influenciam a escolha do compressor são citados no capítulo 5 deste trabalho.

Além destes fatores, é preciso respeitar a faixa de aplicação do compressor para que esteja dentro do que foi projetado. A Tabela 7 mostra a faixa de aplicação de alguns modelos de compressores, dando informações importantes como a vazão aspirada, a pressão de saída ( $P_2$ ) e a relação entre pressão de entrada ( $P_1$ ) e pressão de saída.

Tabela 7 – Faixa de Aplicação dos Compressores

COMPRESSOR	VAZÃO ASPIRADA (m <sup>3</sup> /min)	P <sub>2</sub> max (kPa)	P <sub>2</sub> / P <sub>1</sub> Max
Alternativo	Até 250	250000 ou mais	4,0 (por cilindro)
Palhetas	2 a 80	900	4,0 (por carcaça)
Parafusos	10 a 700	4500	4,0 (por carcaça)
Centrífugos	50 a 2800	70000	10,0 (por carcaça de múltiplos estágios).
Axiais	1500 a 25000	1000	6,0 (por carcaça de múltiplos estágios)

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, s.d.)

Segundo Sá (2009), existem alguns critérios que definem o correto dimensionamento do compressor e maior eficiência energética, são eles:

- 1) O compressor deve possuir consumo em vazio representando de 15% a 25% o consumo com potência nominal.
- 2) Operar em carga com regime médio superior a 75%.
- 3) Instalar compressores de baixa capacidade para períodos de baixo consumo de ar.
- 4) Instalar compressores de velocidade variável.

Este último critério é vantajoso quando o consumo do sistema é irregular, dessa maneira o compressor irá produzir apenas o ar comprimido necessário para o consumo das cargas, garantindo a estabilidade de pressão no sistema.

#### 5.7.2.1.1 Cuidados com superdimensionamento do compressor

Quando é determinado o melhor tipo de compressor do sistema, o próximo passo é definir a potência do compressor e escolher um modelo em específico. Essa etapa requer muita atenção, pois pode ocorrer o superdimensionamento do compressor. Este que ocasiona maior consumo de energia elétrica e conseqüentemente menor viabilidade econômica, pois o bom dimensionamento possibilita a utilização de um compressor de menor potência e garante economias tanto no valor do compressor, já que um de maior potência geralmente tem um custo maior, quanto no consumo de energia.

Segundo Sá (2009) a Tabela 8 faz a comparação de um compressor bem dimensionado e um superdimensionado, levando em consideração um período de trabalho de seis mil hora por ano. A potência dos compressores está na unidade Quilowatts de capacidade elétrica (kWe). O exemplo ainda mostra o percentual de operação sob carga.

Para o cálculo da potência média consumida utiliza-se a equação (28).

$$Pot_{média} = (Fun\%_{carga} + Fun\%_{vazio} \cdot Pot\%_{vazio}) \cdot Pot_{compressor} \quad (28)$$

Onde:

$Pot_{média}$  = Potência média consumida, em kW;

$Fun\%_{carga}$  = Percentual de funcionamento sob carga;

$Fun\%_{vazio}$  = Percentual de funcionamento em vazio;

$Pot\%_{vazio}$  = Percentual de potência em vazio em relação à potência nominal (no exemplo da tabela utilizou-se o caso mais crítico dentro do aceito, 25%);

$Pot_{compressor}$  = Potência do compressor, em kW.

E a energia elétrica consumida é obtida por meio da equação (29).

$$E_{consumida} = Pot_{média} \cdot T_{anual} \quad (29)$$



Onde:

$E_{\text{consumida}}$  = Energia elétrica consumida, em Wh/ano;

$T_{\text{anual}}$  = Período de trabalho anual.

Tabela 8 - Comparação de Compressor Bem Dimensionado e um Compressor Superdimensionado

6.000 h/ano	Compressor 300 kWe	Compressor 200 kWe
Funcionamento em carga	60 %	90 %
Potência média consumida	210 kW	185 kW
Energia eléctrica consumida	1,26 GWh/ano	1,11 GWh/ano

Fonte: (SÁ, 2009).

Analisando a Tabela 8 é possível perceber que o compressor de 300kW é superdimensionado, e o compressor de 200 kW é bem dimensionado e, ao realizar a diferença da energia elétrica consumida pelos dois compressores é possível ver a energia excedente. Neste caso seria 0,15 GWh/ano, e utilizando a tarifação da concessionária observa-se o valor em reais que será economizado.

#### 5.7.2.2 Redução da temperatura aspirada pelo compressor

O compressor é responsável por captar o ar com pressão atmosférica e aumenta-la até a pressão de trabalho do sistema, sendo a temperatura em que esse ar é aspirado uma das medidas que aumentam a eficiência energética do sistema.

Uma breve explicação sobre como a temperatura influencia no consumo de energia elétrica, requer um conceito básico sobre convecção térmica do ar. Como é de conhecimento da termodinâmica, o ar frio é mais denso do que o ar quente, desse modo diz-se que o ar quente sobe enquanto o ar frio desce. Neste caso, o que ocorre é que as moléculas estão mais próximas no ar frio, enquanto no ar quente elas dilatam-se e ficam mais espalhadas. Desta maneira, segundo Rocha e Monteiro (2005) um volume de ar frio apresentará maior massa em relação à um mesmo volume de ar quente, que será aspirada pelo compressor.

Portanto, não é recomendado que o ar ambiente da sala de compressores seja aspirado, pois este apresenta uma maior temperatura. O ideal é o compressor aspirar o ar exterior, que apresenta menor temperatura. Também deve atentar-se em ejetar o ar quente gerado pela compressão e que passa pelo processo de resfriamento, para um local exterior em relação à sala de compressores (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Rocha e Monteiro (s.d.) afirmam que se for necessária a canalização para a tomada de ar exterior, esta deve ser curta, possuir grande diâmetro e o filtro deve estar sempre limpo. Respeitando esses critérios, a perda de carga será a menor possível.

A Tabela 9 faz a relação entre temperatura de aspiração e o percentual de potência que pode ser economizada se a temperatura baixar, ou incrementada, se a temperatura aumentar. A base é 21°C.

Tabela 9 – Variação do Consumo com a Temperatura de Aspiração

<b>TEMPERATURA DO AR DE ASPIRAÇÃO (°C)</b>	<b>PERCENTUAL DE POTÊNCIA ECONOMIZADA, OU INCREMENTADA, COM REFERÊNCIA À TEMPERATURA DE 21°C</b>
-1,0	7,5 (economizado)
4,0	5,7 (economizado)
10,0	3,8 (economizado)
16,0	1,9 (economizado)
21,0	0,0
27,0	1,9 (incrementado)
32,0	3,8 (incrementado)
38,0	5,7 (incrementado)
43,0	7,6 (incrementado)
49,0	9,5 (incrementado)

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

### 5.7.2.3 Dimensionamento correto da pressão de desarme

O dimensionamento correto da pressão de desarme evita que o compressor trabalhe além do necessário, já que isso ocasiona o aumento no consumo de energia elétrica e resulta em perdas, uma vez que o compressor trabalhará sem necessidade proporcionando um efeito econômico negativo.

Segundo Rocha e Monteiro (2005), o valor da pressão de desarme ajustada no pressostado de controle de ciclo deve estar próximo à pressão média do sistema. Recomenda-se portanto projetar essa diferença entre as duas pressões em no máximo 0,8 bar, que é correspondente às perdas de carga máxima do sistema.

“O aumento de 1 bar no ajuste da pressão de desarme leva a um aumento de 6% na potência consumida pelos motores dos compressores, para pressões em torno de 6 a 7 bar” (ROCHA e MONTEIRO, 2005, p.136).

A relação entre a potência necessária para comprimir o ar e a pressão de desarme no estágio de compressão é mostrada na Tabela 10, e a partir dela é possível estimar o percentual de potência adicional que o compressor utilizará caso a pressão de desarme esteja superdimensionada.

Tabela 10 – Variação de Consumo com Pressão de Desarme

PRESSÃO DE DESARME IDEAL OU AJUSTADA (bar)	POTÊNCIA REQUERIDA PARA COMPRIMIR CONTINUAMENTE 1 m <sup>3</sup> DE AR POR MINUTO (cv/m <sup>3</sup> / min)
0,70	1,29
1,75	2,65
3,50	4,25
5,60	5,70
7,00	6,49
10,50	8,02
14,00	9,28

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Rocha e Monteiro (2005) afirma que é possível encontrar o percentual adicional de potência para um sistema com determinada pressão de desarme seguindo os passos listados a baixo.

O primeiro passo é definir a pressão de desarme ideal, por meio da equação (30) e levando em consideração as pressões em bar.

$$P_{desarme\ ideal} = P_{trabalho} + 0,8 \quad (30)$$

O segundo passo é descobrir a pressão excedente através da diferença entre a pressão de desarme ideal e a pressão de desarme ajustada, conforme equação (31).

$$P_{desarme\ excedente} = P_{desarme\ ajustada} - P_{desarme\ ideal} \quad (31)$$

O terceiro passo é determinar por meio da Tabela 9 os valores de potência referida à pressão de desarme ajustada e a potência referida à pressão de desarme ideal.

O quarto passo é determinar a potência excedente através da diferença da potência ajustada e potência ideal, conforme equação (32).

$$Pot_{excedente} = Pot_{pressão\ ajustada} - Pot_{pressão\ ideal} \quad (32)$$

O quinto passo é determinar o percentual de redução por meio da equação (33).

$$Redução\% = \frac{Pot_{excedente}}{Pot_{pressão\ ideal}} \cdot 100 \quad (33)$$

O sexto passo é estimar o consumo adicional de energia elétrica em razão da pressão de desarme ser ajustada acima da ideal, utilizando este percentual de redução.

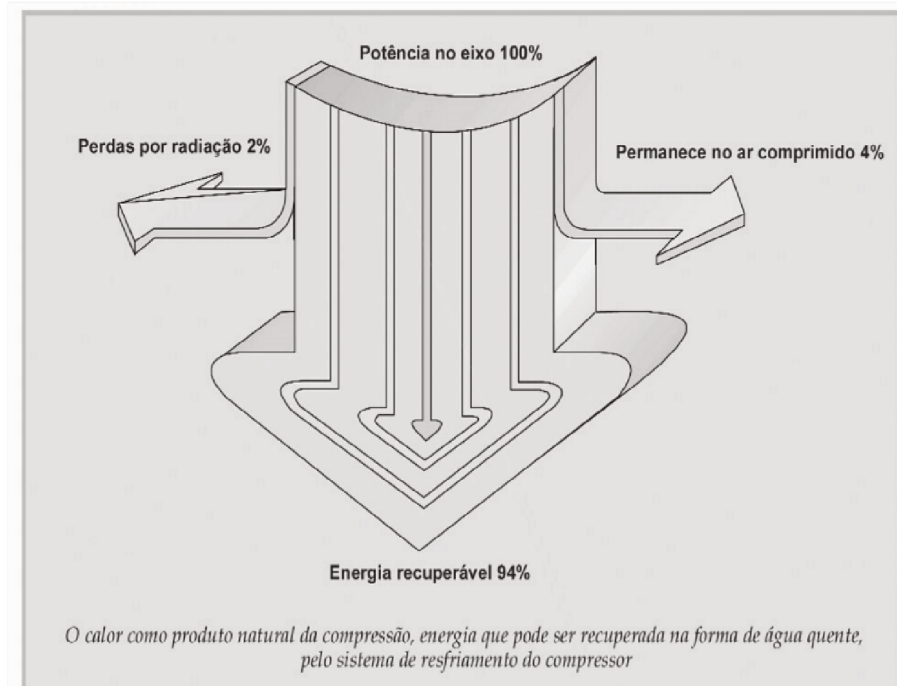
O sétimo e último passo é levantar o consumo médio mensal e aplicar o percentual sobre ele para obter o consumo excedente. Pode-se ainda aplicar as taxas sobre cobrança de energia elétrica cujo o valor depende da concessionária, para a visualização econômica em reais do valor excedente (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

#### 5.7.2.4 Recuperação da energia térmica perdida na compressão

Como mencionado ao longo deste trabalho, o processo de compressão aumenta a pressão do ar e conseqüentemente aumenta sua temperatura. Portanto o ar comprimido sai com elevada temperatura e posteriormente é esfriado pelo resfriador do sistema e pelo aftercooler. O resfriamento do ar comprimido pode ser feito por meio da troca de calor com ar ou água, e este produto que possui temperatura elevada normalmente é descartado para o meio externo, provocando grande desperdício.

Toda a energia contida no eixo do compressor é convertida em energia térmica e mais de 90% dela pode ser recuperada, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Energia Recuperável do Processo de Compressão



Fonte: (ROCHA, 2005).

Segundo Rocha e Monteiro (2005) o ar ou água aquecidos podem ser utilizados em outro processo ao invés de serem descartados. Eles podem ser utilizados em processos que necessitem de um aquecimento dentro da planta da empresa, como no caso de esquentar determinados fluidos.

Essa medida é a que gera mais economia em um sistema de ar comprimido, pois apresenta uma grande recuperação de energia, conforme mostra a Tabela 11, com um regime de trabalho de duas mil horas no ano (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Tabela 11 – Energia que pode ser recuperada

<b>DLE</b>	<b>TAXA DE CALOR</b>	<b>QUANTIDADE GANHA EM 2000 HORAS DE OPERAÇÃO</b>
m <sup>3</sup> /min	kW	kWh/ano
6,4	34	68.000
7,4	40	80.000
11,4	51	102.000
14,0	61	122.000
18,7	92	184.000
21,6	109	218.000
23,2	118	236.000
27,9	137	274.000
34,8	176	352.000
43,1	215	430.000
46,9	235	470.000
46,5	229	458.000
51,3	253	506.000
56,9	284	568.000
62,9	319	638.000
69,7	366	732.000
75,4	359	718.000
83,2	392	784.000
103,6	490	980.000
124,5	602	1.200.000

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

#### 5.7.2.5 Tratamento adequado do ar comprimido

O ar comprimido apresenta umidade, partículas sólidas, poeira e necessita ser tratado para que o sistema possa funcionar de maneira adequada, e este tratamento apresenta várias vantagens, conforme o capítulo 5 deste trabalho. O ar deve ser tratado para apresentar a qualidade adequada à classe que o sistema precisa (as classes são listadas na Figura 18 no item 5.5.1 deste trabalho. Os processos que realizam este tratamento do ar comprimido são a secagem, a filtração e a drenagem.

Para o ar comprimido alcançar a classe desejada um estudo deve ser realizado, visando alcançar a qualidade e evitar custos desnecessários. Cada processo possui diferentes formas de ser executado e à medida que vão se tornando mais complexos, apresentam por um lado melhores resultados e maior qualidade, mas em contrapartida os custos aumentam. Por este motivo o estudo deve ser preciso para que o ar alcance a qualidade desejada com o menor custo (compra de equipamentos e manutenção) possível.

#### 5.7.2.6 Redução das perdas por vazamento nas linhas de distribuição

Os vazamentos estão presentes em todos os sistemas de ar comprimido, sobretudo nas linhas de distribuição, e estes representam uma grande perda. O desgaste do sistema de distribuição é natural e inevitável visto que os tubos estão sujeitos à corrosão, esta que se desenvolve por meio de furos e vazamento do ar e pode diminuir em função da drenagem de condensado eficiente.

A Tabela 12 apresenta a relação entre a perda de pressão do sistema e do diâmetro do furo.

Tabela 12 – Perda de vazão com vazamentos

Diâmetro furo (mm)	Perda a 4 bar (m3/min)	Perda a 6 bar (m3/min)	Perda a 7 bar (m3/min)	Perda a 8 bar (m3/min)	Perda a 10 bar (m3/min)
1	0,01	0,06	0,07	0,09	0,10
2	0,16	0,25	0,28	0,33	0,62
3	0,40	0,57	0,64	0,73	0,90
4	0,72	1,00	1,13	1,29	1,57
5	1,12	1,57	1,77	2,00	2,44
6	1,60	2,27	2,54	2,86	3,78
8	2,80	4,04	4,52	5,03	6,73
10	4,32	6,31	7,07	7,80	10,52

Fonte: (SÁ, 2009).

Além da perda de eficiência e aumento de custos, os vazamentos causam impacto negativo em mais campos do sistema. Eles causam uma flutuação na pressão do sistema afetando os demais equipamentos e consumidores finais, o que acarreta em impacto na

produção. O compressor por sua vez é obrigado a trabalhar mais para suprir as perdas, o que gera custos desnecessários, diminui a vida útil dos equipamentos e aumenta o índice de manutenção (ROCHA e MONTEIRO, s.d.).

É possível ter uma noção do percentual de perdas por vazamentos de uma instalação de acordo com a idade e a conservação do sistema de distribuição. O percentual não é superior a 5% em uma instalação de até 7 anos e em bom estado de conservação, já em uma instalação com mesma idade, mas em condições precárias pode ter percentual de 5 a 10% (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Por outro lado, instalações de 7 a 15 anos em estado regular apresentam percentual entre 10 e 15%, já uma de mesa idade em condições precárias apresenta um percentual entre 15 e 20%. E instalações com mais de 15 anos e estão em estado precário, possuem um percentual maior que 20% (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

A manutenção constante e preventiva realizada através de técnicas de ultrassom e observação por meio dos funcionários é importante para a redução dos vazamentos, mas infelizmente ela nem sempre é praticada. Segundo Hahn (2004) a colocação de válvulas solenoides nos equipamentos que utilizam o ar comprimido diminuiriam os vazamentos, de modo que quando o equipamento é desligado a solenoide se fecha evitando vazamentos.

#### 5.7.2.6.1 Economia por redução dos vazamentos

Para determinar a economia ao reduzir as perdas por vazamentos é necessário realizar um teste (neste trabalho será aplicado o teste de medição do tempo em carga,), que deve ser aplicado em compressores que não apresentem modulação.

Hahn (2004) cita os procedimentos para realizar este teste: desligar todos os equipamentos de consumo final; ligar o compressor e esperar encher o reservatório de ar comprimido até a pressão de trabalho do sistema; por pelo menos cinco ciclos de compressão medir o tempo em carga do compressor; e medir o tempo total para completar os cinco ciclos.

Com base nestes dados e a equação (34), é calculado o caudal do vazamento:

$$V_V = V_C \cdot \frac{\sum_{i=1}^m t_{ci}}{t_t} \quad (34)$$



Onde:

$V_V$  = Caudal do vazamento, em  $m^3/min$ ;

$V_C$  = Vazão de ar do compressor, em  $m^3/min$ ;

$t_c$  = Tempo de funcionamento em carga, durante a medição, em s;

$t_t$  = Tempo de medição total, em s; e

$m$  = Número de ciclos de carga/alívio na medição.

Conhecendo o caudal do vazamento, é possível calcular o percentual de perdas com a equação (35):

$$V_{\%} = \frac{V_V}{\sum_{i=1}^c V_{Ci}} \cdot 100 \quad (35)$$

Onde:

$V_{\%}$  = Percentual de perdas por vazamentos, em %;

$V_{Ci}$  = Vazão total de todos os compressores, em  $m^3/min$ ; e

$c$  = Número de compressores do sistema.

Com o cálculo do percentual de vazamentos é possível definir o custo da perda por vazamentos, a partir da equação (36).

$$C_V = C_{ac} \cdot \frac{V_{\%}}{100} \quad (36)$$

Onde:

$C_V$  = Custo de perda por vazamentos, em R\$/a; e

$C_{ac}$  = Custo anual da geração de ar comprimido, em carga, em R\$/a

#### 5.7.2.6.2 Maior atuação de purgadores

Solucionado parcialmente ou completamente os problemas com vazamentos, os purgadores deverão operar por mais tempo, uma vez que o condensado estará presente em maior quantidade nas tubulações.

Segundo ARCOMPRESSIBRASIL (s.d), o purgador é responsável por drenar e acabar com a contaminação líquida (condensado) no sistema, evitando ao máximo perdas de ar comprimido, e podem ser divididos em automáticos eletrônicos e mecânicos.

O purgador automático eletrônico (Figura 17) possui uma válvula solenoide que atua conforme a regulação do temporizador, que deve acontecer de acordo com a necessidade do sistema. Leva 1 minuto e 59 segundos para realizar a drenagem e possui uma temperatura máxima de 90°C (ARCOMPRESSIBRASIL, s.d).

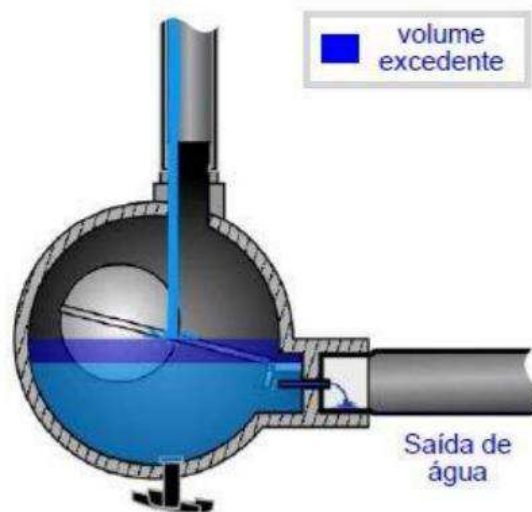
Figura 17 – Purgadores automáticos eletrônicos



Fonte: (ARCOMPRESSIBRASIL, s.d)

O purgador boia magnético (Figura 18) faz a detecção da água através de uma boia, e a retira. É um sistema mecânico eficiente, possui pressão de trabalho até 16 bar e uma temperatura máxima de 50°C (ARCOMPRESSIBRASIL, s.d).

Figura 18 – Construção do purgador boia magnético



Fonte: (ARCOMPRESSIBRASIL, s.d).

### 5.7.2.7 Implementação de um sistema de controle carga – alívio – parada

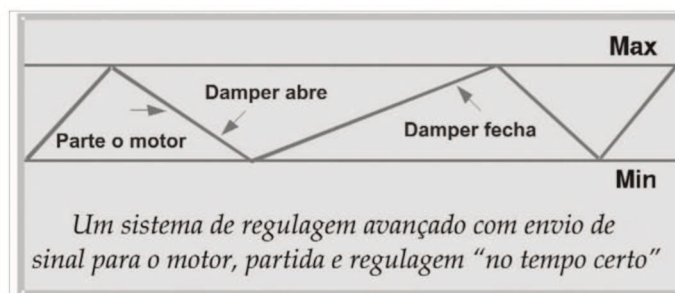
Um sistema de controle permite o fornecimento do ar à uma pressão constante aos consumidores e é muito utilizado em sistemas onde a vazão e a pressão variam. O consumo de energia do sistema representa praticamente todo o custo do ar comprimido, podendo alcançar até 80%. Por isso a utilização de um sistema de controle é muito importante (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O sistema de controle apresentado é conhecido como carga – alívio – parada, que segundo Rocha e Monteiro (2005) é o modelo mais utilizado atualmente para compressores com mais de 5 kW de potência. Este método possui baixas perdas de potência no eixo e uma grande faixa de regulagem. Existem duas maneiras de realizar este controle.

Na primeira o sistema possui uma válvula solenoide e um damper (Figura 19). O damper é uma válvula que tem a função de regular o fluxo do ar que irá ser aspirado pelo compressor. Deste modo, ao aumentar a demanda a solenoide recebe um sinal e coloca o damper em posição aberta, enquanto o compressor trabalha em carga produzindo ar comprimido. Quando o damper está em posição fechada, o compressor trabalha em vazio consumindo menos energia. Porém este sistema de controle é lento, funcionando em uma faixa de pressão liga-desliga de 0,5 bar (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O segundo modo é utilizar um transdutor de pressão ao invés do sistema que aciona a válvula solenoide. E este transdutor tem a capacidade de sentir a mudança de pressão mais rapidamente, e faz o acionamento do damper. A faixa de pressão reduz para 0,2 bar (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

Figura 19 – Operação do sistema carga – alívio – parada.



Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, 2005).

O sistema de controle carga – alívio – parada resulta em uma redução dos ciclos liga-desliga do motor, o que ocasiona uma redução no consumo de energia e também aumenta a vida útil do motor, compressor e demais equipamentos.

#### 5.7.2.8 Utilização adequada do ar comprimido para evitar desperdícios

O ar comprimido é aplicável em diversas atividades e por esse motivo está presente em praticamente todas as indústrias, independente do ramo de atuação. Sua geração e tratamento possuem um custo elevado, desse modo, as indústrias que querem ser competitivas no mercado devem usá-lo de maneira eficiente, evitando desperdícios e gastos desnecessários.

Diversas aplicações possuem pressão de uso baixa não sendo necessário o uso do ar comprimido, de modo que outras soluções ou mesmo fontes de ar podem apresentar menor custo nestes casos (ROCHA e MONTEIRO, s.d.).

A Tabela 13 ilustra o exemplo de usos que podem ser inapropriados, e apresenta soluções alternativas.

Tabela 13 – Potenciais usos inapropriados de ar comprimido

<b>USOS POTENCIALMENTE INAPROPRIADOS</b>	<b>SUGESTÕES DE ALTERNATIVAS/AÇÕES</b>
Limpeza, secagem, processo de resfriamento	Sopradores de baixa pressão, ventiladores elétricos, vassouras/escovas, bocais
Espalhamento / polvilhamento	Sopradores de baixa pressão e misturadores
Aspiração, atomização	Sopradores de baixa pressão
Deslocamento	Sopradores de baixa para média pressão
Geração de vácuo	Bomba de vácuo dedicada ou sistema central de vácuo
Climatização pessoal	Ventiladores Elétricos
Tubos abertos, resfriamento por vortex operado por ar comprimido sem termostato	Trocador de calor ar / ar ou ar condicionado com termostato para Resfriamento
Misturador acionado por ar	Misturador acionado por motor elétrico
Bombas de diafragma operadas a ar	Regulador com controlador de velocidade adequado, bomba elétrica
Equipamentos ociosos	Coloque uma válvula na entrada de ar e que seja controlada automaticamente
Equipamentos abandonados	Desconectar o suprimento de ar do equipamento

Fonte: (ROCHA e MONTEIRO, s.d.)

Para o uso em limpeza, as soluções presentes na Tabela 11 apresentam maior eficiência, sendo desnecessária a utilização de ar comprimido. Para a climatização de ambientes, os ventiladores ou até mesmo ar condicionado são mais acessíveis financeiramente e mais seguros que a utilização do ar comprimido. O acionamento de bombas à ar podem ser realizados por motores elétricos que possuem maior eficiência energética, com exceção de ambientes perigosos, onde o acionamento deve ocorrer por meio de motores de ar comprimido (ROCHA e MONTEIRO, s.d.).

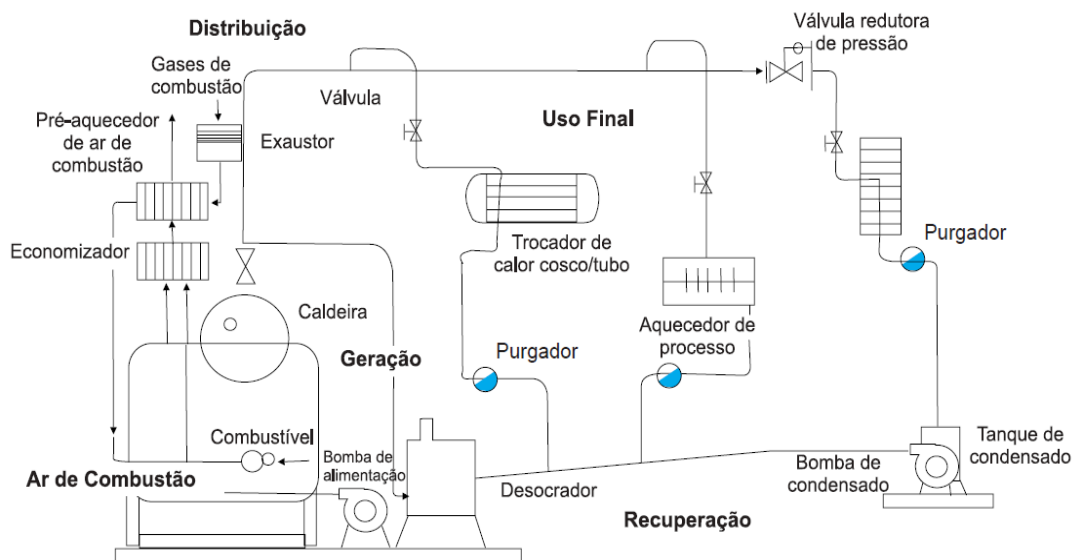
## 6 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DE VAPOR

### 6.1 FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE VAPOR

O sistema de geração de vapor segundo SILVA (1957), tem seu processo iniciado com o pré-aquecimento do ar através de um aquecedor, provido por gases da fornalha e posterior contato com o combustível. A combustão libera gases em elevada temperatura, e estes são deslocados por meio da tiragem da chaminé. O economizador promove o aquecimento da água por meio da alta temperatura dos gases da combustão, e a água é levada às caldeiras, onde é vaporizada. O vapor passa pelo superaquecedor para ter sua temperatura aumentada, e assim evitar a condensação.

A Figura 20 mostra um sistema completo de vapor, com suas quatro principais áreas.

Figura 20 – Sistema de vapor completo



Fonte: (NOGUEIRA et al, s.d.).

No sistema de geração de vapor a água é aquecida por meio do calor proveniente da combustão de combustíveis, e muda do estado líquido para o gasoso (vapor), este processo ocorre na caldeira. Além da caldeira, a alimentação de combustível, sistema de ar de combustão, a alimentação de água e tiragem dos gases de exaustão formam o sistema de geração (NOGUEIRA et al, s.d.).

O sistema de distribuição é formado por linhas separadas por válvulas de isolamento e por válvulas reguladoras de pressão, que conduzem o vapor até o uso final, com pressão adequada

à aplicação. A boa drenagem de condensado, isolamento térmico e balanceamento de pressão entre as linhas são variáveis para o desempenho eficiente do sistema de distribuição (NOGUEIRA et al, s.d.).

O sistema de uso final é comumente formado por trocadores de calor, turbinas e tanques de reação química dependendo do tipo de aplicação. Por meio do trocador, o calor contido no vapor é passado para outro fluido, após isso o vapor condensa. Em uma turbina, a energia térmica do vapor é transformada em energia mecânica (NOGUEIRA et al, s.d.).

O sistema de retorno de condensado é responsável por levar o condensado para a caldeira, passando antes pelo desaerador e tem sua pressão aumentada por bombas para ficar com a mesma pressão da água de alimentação (NOGUEIRA et al, s.d.).

## 6.2 COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO

### 6.2.1 Combustível

A produção de vapor ocorre por meio do fornecimento de calor e queima de combustível, que contém em sua composição carbono, hidrogênio, e outros elementos reagentes como oxigênio e enxofre (NOGUEIRA et al, 2005).

Os combustíveis podem ser classificados de acordo com seu estado físico em sólidos (madeira, bagaço de cana, turfa, carvão mineral, etc), líquidos (óleo de xisto, líquidos derivados do petróleo, licor negro, álcool, etc), e gasosos (metano, hidrogênio, gás de madeira, biogás, etc).

### 6.2.2 Combustão

A reação química entre um combustível e um comburente (elemento que fornece o oxigênio) é denominada combustão. A Tabela 14 apresenta respectivamente as reações elementares para o estudo da combustão referentes à oxidação completa e incompleta do carbono, oxidação do hidrogênio e do enxofre. Observa-se que para cada caso existe uma quantidade determinada de oxigênio e energia liberada e que a água na forma líquida libera se comparada à queima parcial do carbono uma quantidade maior de energia (NOGUEIRA et al, 2005).

A proporção exata de ar e combustível para uma combustão completa é conhecida como relação *ar/combustível estequiométrica* e é uma propriedade característica de cada combustível. Durante a combustão, a umidade e o teor de cinzas afetam esta relação pois parte do peso do combustível é composta por água e outros materiais não reagentes, o que pode acarretar no consumo de metade do ar requerido pela mesma quantidade de combustível seco, como no caso do bagaço de cana (NOGUEIRA et al, 2005)

Tabela 14 – Reações básicas de combustão

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

Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.2.2.1 Poder calorífico de combustíveis

A quantidade de energia interna de um combustível determina seu poder calorífico. Segundo SOUZA (s.d.) de maneira geral, um combustível é formado de hidrogênio e carbono, e quanto mais rico ele for em hidrogênio, maior poder calorífico ele possuirá, pois o hidrogênio possui um poder calorífico de 28700 kcal/kg, enquanto o carbono possui apenas 8140 kcal/kg.

Existem dois tipos de poder calorífico, o superior e o inferior, sendo o último o que deve ser considerado em razão da temperatura de combustão ser muito elevada, fazendo com que a água permaneça sempre no estado de vapor.

O poder calorífico superior representa a quantidade de calor produzido por uma quantidade de combustível quando este entra em combustão e excesso de ar, e ocorre a condensação da água presente por conta dos gases serem resfriados. O poder calorífico inferior, assim como o superior, representa a quantidade de calor produzido por uma mesma quantidade de combustível em processo de combustão e excesso de ar, porém a água permanece em estado de vapor pois os gases são resfriados até a temperatura de ebulição da água (SOUZA, S.d.).

O poder calorífico inferior de alguns dos combustíveis mais utilizados está mostrado na Tabela 15.



Tabela 15 – Poder Calorífico Inferior para Alguns Combustíveis

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

Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.3 EXCESSO DE AR

Para garantir que todo o combustível se oxide durante a reação de combustão deve ser acrescentada uma quantidade mínima de ar em excesso (geralmente entre 5 e 10%), pois o ar possui uma grande parcela de nitrogênio que ao ser acrescentado arrasta para a chaminé parte do calor produzido na reação, resultando em perda de eficiência no processo, como representado na Figura 21. O excesso de ar é medido através da composição dos gases da combustão em base seca, bem como seus teores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>).

Figura 21 – Efeito do excesso de ar sobre as perdas



Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

Para um processo de combustão eficiente onde as quantidades de ar e combustível são proporcionais, é preciso adotar algumas medidas, são elas:

- Para que a reação química seja completa, o comburente deve estar em quantidade suficiente para que o mínimo de ar seja inserido no processo.

- A mistura do comburente com o combustível deve ser homogênea, e o uso de queimadores corretos garante a oxidação completa do combustível.
- Combustíveis líquidos com menor viscosidade se misturam ao ar com mais facilidade. Para que isso ocorra é necessário o preaquecimento, atentando para que a temperatura não se aproxime do ponto de fulgor do óleo combustível, que é a mínima temperatura na qual um combustível é capaz de ser inflamável.
- Combustíveis sólidos com menor granulometria garantem uma área de contato com o comburente maior, favorecendo a combustão.

## 6.4 EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO

### 6.4.1. Fornalhas

Segundo Nogueira et al (2005), fornalha é uma denominação genérica de um local onde o combustível é queimado gerando produtos pós combustão. Pode ser formada por queimadores, no caso de combustíveis líquidos e gasosos, grelhas para combustíveis sólidos, ou câmaras de combustão.

A fornalha é responsável por elevar a temperatura dos combustíveis eliminando as substâncias voláteis e proporcionando a condição ideal para a combustão completa, impedindo a troca de calor entre os gases quentes e o ambiente. Em seu interior as paredes são revestidas com camadas de tijolos refratários, fixados com argamassa também refratária, promovendo resistência contra o choque térmico, elevadas temperaturas e dilatação.

Existem dois tipos de fornalhas, as com combustão sobre suporte, que englobam todas as fornalhas que queimam combustíveis sólidos em tamanhos grosseiros, e podem ter grelhas fixas, inclinadas, rotativas ou basculantes variando de acordo com a qualidade de quantidade de combustível.

Outro tipo de fornalha é chamada queima em suspensão, que através do maçarico, queimador ou combustor, realiza a dispersão do combustível (óleo, gases ou combustíveis sólidos pulverizados) de forma homogênea (NOGUEIRA et al, 2005).

## 6.4.2 Queimadores

Segundo Garcia (2002), os queimadores são responsáveis pela queima de um combustível dentro da fornalha. Contemplam como principal função a mistura do ar com o combustível, para a geração de uma chama equilibrada. É de seu dever ainda, garantir que não haverá retorno nem deslocamento da chama.

Existem queimadores para os três estados da matéria, sólido líquido e gasoso, são eles:

### 6.4.2.1 Pulverização à ar

O queimador de pulverização à ar possui duas faixas de pressão, a baixa pressão (para queimadores até 500 mmca) e média pressão (queimadores de 1000 mmca). Este queimador é indicado para a queima de no máximo 50 kg/h de óleo, ou seja, para unidades de baixo porte.

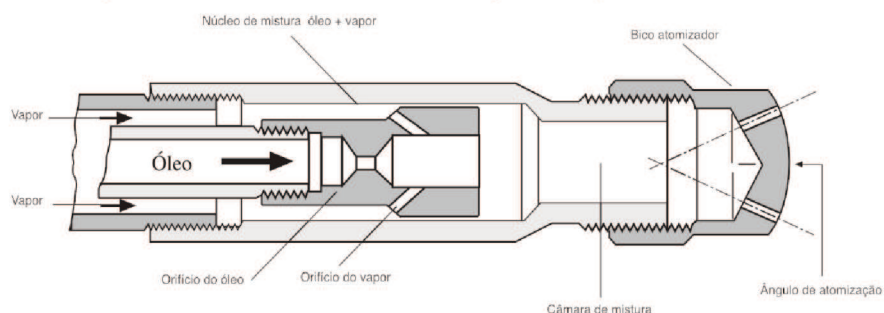
Seu funcionamento consiste em escoar o óleo, o que pode ser feito por uma bomba ou por gravidade. O ar que realiza a pulverização do óleo é insuflado por um ventilador.

Não apresenta uma pulverização uniforme, e opera com até 40% de excesso de ar. O ar pulverizado representa apenas 20% do ar necessário para a combustão (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.4.2.2 Pulverização à vapor

O queimador de pulverização à vapor possibilita uma pulverização mais refinada e acentuada pelo aquecimento, o único inconveniente é que o vapor saturado consome uma parte do calor produzido na combustão (NOGUEIRA et al, 2005). A Figura 22 mostra a concepção deste queimador.

Figura 22 - Maçarico de queimador a óleo com atomização a vapor



Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.4.2.3 Queimador de copo rotativo

Seu funcionamento consiste em colocar o óleo no interior de um tronco cônico, parecendo um copo, que possui uma rotação de 3600 rpm. O combustível então é levado ao encontro de ar com alta pressão.

Este tipo de queimador é o mais utilizado em geradores de vapor que possuem a capacidade de queima de até 500 kg/h de óleo, porém existem casos especiais em que possuem maior rotação e uma capacidade de queima maior. Possui bom desempenho, e a capacidade de modulação de carga é uma de suas vantagens (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.4.2.4 Pulverização mecânica

A pulverização do óleo ocorre por um escoamento estreito em alta velocidade através de pequenos orifícios, essa velocidade e energia necessárias são mantidas por uma bomba de engrenagens (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.4.2.5 Queimadores de combustíveis gasosos

A queima de combustíveis gasosos é mais simples, pois o comburente se mistura de maneira mais fácil do que qualquer combustível.

Dois tipos de queimadores de combustíveis gasosos se destacam: o de mistura e o de difusão. A diferença entre os dois é o momento da mistura do ar com o gás, enquanto os queimadores de mistura realizam este processo antes de coloca-los câmara de combustão, os queimadores de difusão colocam os dois fluidos de maneira separada, ou seja, a mistura ocorre dentro da câmara (NOGUEIRA et al, 2005)

#### 6.4.2.6 Queimadores de combustíveis sólidos pulverizados

Os combustíveis sólidos são particulados e queimados em suspensão dentro da câmara de combustão. O combustível sólido mais utilizado é o carvão mineral, muito utilizado nas termoelétricas, porém outros combustíveis como bagaço de cana, ou outros resíduos também são utilizados (NOGUEIRA et al, 2005)

A utilização de combustíveis sólidos permite a cogeração de energia, aproveitando resíduos que antes seriam apenas descartados, para a geração de energia. Um grande exemplo é o bagaço da cana de açúcar. Esta medida aumenta o índice de eficiência energética e economia de recursos financeiros.

### **6.4.3 Tiragem**

Tiragem é o processo de retirada dos gases provenientes da combustão para a atmosfera, podendo ocorrer de modo natural, onde o ar sai pela chaminé por diferenças de temperatura sem ajuda de equipamentos, forçada ou induzida, que utiliza sopradores ou exaustores para a retirada dos gases, ou mista, que utiliza dois ventiladores sendo um para forçar a entrada do ar na caldeira (soprador) e outro para facilitar a retirada do mesmo (exaustor).

## **6.5 GERADORES DE VAPOR**

São equipamentos cuja função é a produção de vapor, aquecendo um líquido, como a água até o processo de vaporização.

Este aquecimento pode ser obtido por meio da queima de um combustível, por meio de aquecimento elétrico (onde resistências elétricas são submersas em água) ou aproveitando calor residual de algum outro processo. Os geradores de vapor pode ser classificados como geradores de vapor de água ou geradores de vapor de outro elemento (SILVA, 1957).

O principal componente do gerador é a caldeira, outros elementos são utilizados em sua composição, como superaquecedor, economizador, aquecedor de ar e chaminé.

### **6.5.1 Caldeiras**

Durante a revolução industrial, com desenvolvimento da máquina à vapor as caldeiras tornaram-se mais comuns. O modelo mais utilizado era denominado tubo de fogo, e os gases provenientes da queima do combustível atravessavam os canos do equipamento para esquentar o tanque de água. Como esse tipo de caldeira é perigoso por possuir elevado risco de explosão, não é utilizado com frequência (WAGNER, 2018).

Existem dois tipos de caldeiras, as flamotubulares e as aquotubulares. Atualmente as caldeiras aquotubulares são mais utilizadas, possibilitando maior produção de vapor em temperaturas elevadas.

#### 6.5.1.1 Componentes clássicos de uma caldeira

Segundo Nogueira et al (2005) a complexidade dos geradores de vapor de grande porte faz com que necessitem de uma robusta estrutura formada por variados componentes, são eles: cinzeiro, fornalha, câmara de combustão, tubos evaporadores, superaquecedor, economizador, pré aquecedor de ar, canais de gases e chaminé, definidos a seguir.

- a) Cinzeiro: Lugar onde são depositados os combustíveis que não completaram o processo de combustão.
- b) Fornalha: Local onde se inicia o processo de combustão.
- c) Câmara de combustão: Componente responsável pelo consumo de combustível antes de migrar para a fornalha.
- d) Tubos evaporadores: Vaso fechado onde acontece a transformação da água em vapor.
- e) Superaquecedor: Eleva a temperatura do vapor gerado na caldeira.
- f) Economizador: Responsável pelo aproveitamento do calor gerado na combustão para o aquecimento da água de alimentação.
- g) Pré-aquecedor ou pré ar: Componente que aquece o ar antes de introduzi-lo na fornalha.
- h) Canais de gases: Dutos que promovem a circulação dos gases de combustão até a chaminé.
- i) Chaminé: Através do efeito de tiragem citado anteriormente, promove a expulsão dos gases de combustão para a atmosfera.

#### 6.5.2 Caldeiras flamotubulares

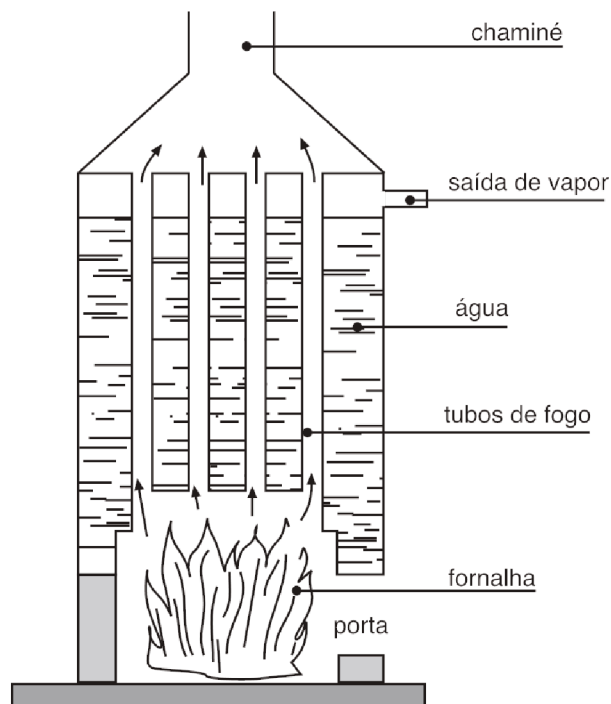
As flamotubulares apresentam algumas vantagens e desvantagens. A grande vantagem desse tipo de caldeira é a boa adaptação à variação de carga, além da fácil construção e a dispensa do tratamento de água apurado. Entre às suas desvantagens estão a necessidade de grande espaço para construção, partida lenta devido ao alto volume de água, pressão limitada,

capacidade limitada e dificuldade na instalação de superaquecedor, economizador e aquecedor de ar (SILVA, 1957).

Neste tipo de caldeira ocorre a circulação dos gases produzidos na combustão pelos tubos, enquanto a água fica armazenada em um cilindro externo. Um outro cilindro interno é usado para a alocação da fornalha, a tiragem é normal, e sua carcaça é formada por chapas. A pressão varia entre 5 e 10 kgf/cm<sup>2</sup> (NOGUEIRA et al, 2005).

Este tipo de caldeira é classificado devido à sua construção podendo ser vertical, horizontal e ainda horizontais multitubulares. A Figura 23 mostra uma caldeira flambotubular vertical.

Figura 23 – Caldeira flambotubular vertical



Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.5.3 Caldeiras aquotubulares

As caldeiras aquotubulares apresentam algumas vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens é possível destacar a pressão ilimitada, capacidade ilimitada, a grande flexibilidade de operação, partida rápida devido ao baixo volume de água, pouco volume ocupado para sua construção, a facilidade para a acoplar superaquecedor, economizador e aquecedor de ar, além do fato da fornalha não ser parte integral da caldeira, o que permite atingir graus de combustão

superiores. No entanto as desvantagens destacam-se quanto à necessidade de tratamento para a água, sensibilidade na variação de carga e a construção mais delicada (SILVA, 1957).

Neste tipo de caldeira a água é aquecida durante sua passagem pela tubulação e o vapor gerado se desloca para as camadas superiores de modo natural, possibilitando a entrada de novas quantidades de água pela tubulação. Conforme a estrutura se desenvolve, o deslocamento proveniente da diferença do peso específico (circulação natural) torna-se ineficiente sendo necessária a utilização de bombas (circulação forçada). Alcança pressões de 150 a 200 kgf/cm<sup>2</sup> (NOGUEIRA et al, 2005).

Esse tipo de caldeira pode ser classificado em função do arranjo dos tubos podendo ser retos ou circulares, com os tambores colocados no sentido transversal ou longitudinal.

#### 6.5.3.1 Circulação da água em caldeiras aquotubulares

As caldeiras constituídas por chapas metálicas precisam ser resfriadas por questões de segurança. Elas são aquecidas pelos gases de alta temperatura provenientes da combustão, e se a temperatura ultrapassar o limite do metal, a resistência mecânica da estrutura diminui gradativamente.

A circulação ocorre de maneira natural devido a diferença de densidade da água presente na área mais fria e em alta temperatura. Conforme a pressão do sistema se eleva, essa circulação natural fica mais complexa, por isso é necessário a implementação de uma circulação forçada (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.5.4 Eficiência térmica

O calor útil e o conteúdo térmico total do combustível são relacionados na eficiência térmica. Esta é calculada através da equação (37):

$$\eta_t = \frac{m_v \cdot (h_{v_s} - h_{v_e})}{m_c \cdot PCI} \quad (37)$$

Onde:

$\eta_t$  = Eficiência térmica;

$m_v$  = Vazão em massa de vapor, em kg/h

$m_c$  = Vazão em massa de combustível, em kg/h

$h_{v_s}$  = Entalpia do vapor de saída, em kJ/kg



$h_{ve}$  = Entalpia do vapor de entrada, em kJ/kg

PCI = Poder calorífico inferior do combustível, em kJ/kg

### **6.5.5 Grau de combustão e vaporização específica**

Nogueira et al. (2005) esclarecem que o grau de combustão representa a unidade de massa de combustível queimado em determinado tempo e área da superfície da grelha expresso em kg/m<sup>2</sup>h para caldeiras de carvão ou petróleo.

A vaporização específica por sua vez, para a caldeira à carvão, representa a quantidade de vapor produzido em superfície de grelha expresso em kg/m<sup>2</sup>h, e para a caldeira à petróleo representa a quantidade de vapor produzido em superfície de aquecimento.

### **6.5.6 Superaquecedores**

Os superaquecedores são equipamentos constituídos de tubos de aço em formato de serpentina, lisos ou aletados, e cujo o diâmetro varia conforme a capacidade da caldeira. Eles podem ser instalados dentro ou fora das caldeiras, necessitando neste caso de uma fonte de calor para o aquecimento. Seu funcionamento consiste em aproveitar os gases da combustão para aquecer o vapor saturado na mesma pressão (NOGUEIRA et al, 2005).

### **6.5.7 Economizadores e Pré-aquecedores**

Os economizadores são equipamentos que possuem a finalidade de aproveitar o calor dos gases de combustão da fornalha, aquecendo a água da caldeira, e os pré-aquecedores por sua vez, são dispositivos volumosos usados para aumentar a temperatura do ar utilizado na queima do combustível (NOGUEIRA et al, 2005).

## **6.6 ALIMENTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS**

A reposição da água transformada em vapor é uma das operações mais importantes na geração de vapor, pois se seu nível diminuir além dos limites permitidos, a segurança do sistema

pode ser comprometida pelo aquecimento das placas metálicas e no pior dos cenários esse superaquecimento pode acarretar em uma explosão (NOGUEIRA et al, 2005).

Além da reposição agrega-se o tratamento adequado, que para atingir todos objetivos deve ser realizado anteriormente ao ingresso para a caldeira e posteriormente ao mesmo. A fonte de reposição, as características químicas e o modo de operação da central são variáveis que determinam os processos para o tratamento anterior.

Processos de filtração, desmineralização, pré-aquecimento, amaciamento e desaeração compõem o tratamento anterior à alimentação de água, e o tratamento posterior é composto pela adição de químicos à água (NOGUEIRA et al, 2005).

Segundo Nogueira et al (2005) estes são os objetivos a serem alcançados com o tratamento da água:

- Prevenir em alta quantidade os sólidos e efluentes presentes na água, estes por sua vez reprimem a taxa de transferência de calor, por meio de incrustação, o que pode desencadear em uma série de problemas por causa do superaquecimento das placas metálicas;
- Eliminar gases corrosivos;
- Prevenir a fragilização caustica e o craqueamento intercrystalino do metal; e
- Prevenir formação de espuma e a condução de materiais estranhos.

### **6.6.1 Sistema de abastecimento de água**

Segundo Togawa (2017) um sistema de abastecimento de água para a caldeira é formado por um tanque de alimentação, uma bomba de água, retorno de condensado, água para reposição e seu tratamento. Um exemplo deste sistema é mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de sistema de alimentação de água para caldeira



Fonte: (TOGAWA, 2017).

Usualmente uma bomba centrífuga de alta pressão acionada por motor elétrico realiza o abastecimento. A faixa de operação desta bomba deve possuir uma pressão 30% maior que a pressão da caldeira, e a vazão deve ter o mesmo valor (TOGAWA, 2017).

Caldeiras de combustíveis sólidos devem possuir um dispositivo mecânico chamado injetor. O injetor, segundo Sousa (2017), aspira a água e a insere na caldeira. Este processo baseia-se no princípio de diferencial de pressão e na velocidade do vapor.

## 6.6.2 Tratamentos anteriores ao reabastecimento

Também conhecidos como tratamentos externos, ocorrem fora do gerador de vapor, e são conhecidos como: processos de clarificação, abrandamento, desmineralização e desareação.

### 6.6.2.1 Clarificação

O processo de clarificação consiste em quatro etapas, a coagulação, a floculação, a decantação e a filtração.

A etapa de coagulação utiliza elementos coagulantes para promover uma reação, a qual faz com que as partículas presentes na água entrem em um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável, formando coágulos. Sais de metais à base de alumínio ou ferro são os coagulantes mais utilizados (COMUSA, 2017).

A floculação por sua vez permite a remoção de cor, turbidez e carga orgânica. Nesta etapa os coágulos se agrupam por meio de contato e formam partículas maiores, os flocos. Estes por sua vez possuem massa específica maior que a massa específica da água, permitindo uma fácil remoção por meio da decantação e da filtração (COMUSA, 2017).

Na decantação ocorre a separação dos flocos e da água, por meio da força da gravidade, os flocos descendem e depositam-se no fundo do decantador, formando uma massa sólida chamado lodo, que deve ser retirada periodicamente (COMUSA, 2017).

Por último, a filtração é responsável pela remoção das partículas e microrganismos presentes na água, sendo que as partículas leves que não foram removidas na decantação são removidas na filtração. O processo consiste em escoar a água em um filtro formado por camadas de areia e carvão antracito, sendo necessário limpar o filtro após o processo (COMUSA, 2017).

#### 6.6.2.2 Abrandamento

Consiste na retirada de cálcio e magnésio da água dura, podendo ser realizado por precipitação química ou troca iônica.

##### 6.6.2.2.1 Precipitação química

Por este método o cálcio e o magnésio são precipitados por reações causadas pela adição de cal e carboneto de sódio à água.

Apresenta a vantagem de conseguir tratar água com altíssima dureza, porém apresenta algumas desvantagens, como a formação de lodo e a necessidade do pós-tratamento para a remoção completa da dureza da água (BFILTERS, 2017).

##### 6.6.2.2.2 Troca iônica

Este processo faz o uso de resinas catiônicas. Estas são esferas de polímeros porosos, carregadas negativamente e que possuem um íon positivo de sódio para ser trocado. Desta maneira, a água atravessa esta resina, os íons de cálcio e magnésio que são positivos são atraídos para as resinas, enquanto o íon de sódio é liberado na água. É necessária a regeneração através de uma solução de alta concentração de sódio, quando todos os íons de sódio forem trocados (BFILTERS, 2017).

A utilização deste método não permite a formação de lodo, além de ter alta eficiência na remoção da dureza. A grande desvantagem é a necessidade de tratamento anterior ao abrandamento, para que os sólidos presentes na água não atrapalhem a troca iônica (BFILTERS, 2017).

#### 6.6.2.3 Desmineralização

Para caldeira com pressões acima de 40kgf/cm<sup>2</sup> o processo de desmineralização é executado sobre trocadores de íons. Conforme a exigência da qualidade da água, aumentam o número de trocadores catiônicos. Bombas dosadores, aparelhos registradores e preparadores de soluções regenerativas completam a composição de uma unidade de desmineralização (NOGUEIRA et al, 2005).

#### 6.6.2.4 Desareação

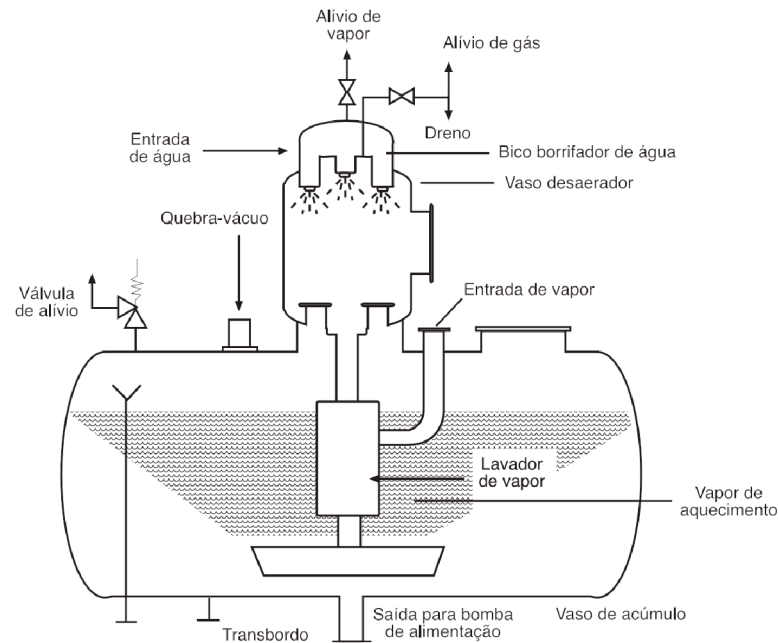
Este processo consiste em retirar mecanicamente gases não condensáveis, sendo os mais importantes o oxigênio e o gás carbônico, da água. Isto resulta no aumento da vida útil do sistema de vapor, uma vez que estes gases causam corrosão nas caldeiras (MECÂNICA INDUSTRIAL, s.d.).

O processo de desareação é baseado na lei de Henry de pressões parciais. A redução da pressão parcial destes gases resulta na diminuição dos mesmos. Um fluxo de vapor contracorrente realiza por pulverização a redução da pressão dos gases (MECÂNICA INDUSTRIAL, s.d.).

Um sistema de desaeração atua em duas fases, a primeira de aquecimento e a segunda de desaeração, e alcança resultados na redução de oxigênio para menos de 0,007 ppm e a retirada total de gás carbônico (MECÂNICA INDUSTRIAL, s.d.).

A válvula de pulverização é um dos elementos principais, esta permite que a água possa ser descarregada. O vapor flui no sentido contrário à água, ocasionando transferência de calor latente. A concentração dos gases não condensáveis é reduzida no ponto em que a água atinge a bacia de recolha com temperatura de 1°C, onde quase todo o vapor foi condensado e os gases são retirados por tubos de ventilação (MECÂNICA INDUSTRIAL, s.d.). A Figura 25 mostra um desaerador à pulverização.

Figura 25 – Desaerador à pulverização



Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.6.3 Tratamento posterior ao abastecimento

O tratamento no interior da caldeira é aplicado apenas para água de baixa dureza. Este consiste na adição de produtos químicos, que possuem como base o trifosfato de sódio, para ocasionarem reações e obterem como resultado a precipitação dos sais de cálcio, de forma a não formar incrustações e tornar solúveis os sais presente na água. O precipitado forma lodo e acumula-se no fundo das caldeiras. Este processo é econômico, e pode ser realizado no tanque de alimentação ou no interior da caldeira (NOGUEIRA et at, 2005).

## 6.7 CONTAMINANTES

Arraste, espuma e partículas de óleo são contaminantes indesejáveis e causam danos ao sistema de vapor.

O vapor ao se desprender da água pode carregar gotículas de água, o que é denominado arraste. Este é evitado pelo tubulão superior, porém ocorre devido à danos nos separadores de vapor, espuma ou nível alto no tubulão e por variações pesadas na carga. O arraste ocasiona danos ao superaquecedor e sistema de condensado, além de corrosão e erosão em caldeira aquotubulares (NOGUEIRA et at, 2005).

A concentração de produtos químicos ocasionam a formação de espuma. Sua intensidade depende dos compostos químicos utilizados. Partículas de óleo também auxiliam na formação de espuma, estes ainda provocam superaquecimento, visto que formam uma camada isolante no interior dos tubos da caldeira (NOGUEIRA et al, 2005).

## 6.8 MEDIÇÃO

Sistemas de medição mantêm as variáveis de um gerador à vapor dentro de limites pré-estabelecidos, garantindo seu perfeito funcionamento e também a segurança no sistema.

### 6.8.1 Sistemas de medição

As principais variáveis acompanhadas e mensuradas pelo sistema de medição são: nível de água, pressão, temperatura e vazão.

### 6.8.2 Sistema de medição do nível de água

A medição do nível de água é muito importante, pois esta banha as partes metálicas da caldeira resfriando-a, deste modo seu nível baixo resulta no aquecimento da caldeira, o que ocasiona em perda de eficiência térmica e até mesmo riscos para a segurança, como explosões (NOGUEIRA et al, 2005).

Os instrumentos utilizados para acompanhar o nível da água podem ser o indicador de nível ou sensores de nível. O indicador é composto por um tubo de vidro, que conecta-se entre a caldeira e o tanque por meio de válvulas de bloqueio e purgador, sua função é indicar o nível entre a água e o vapor. Os indicadores podem ser visores tubulares, visores reflex ou visores transparentes (NOGUEIRA et al, 2005).

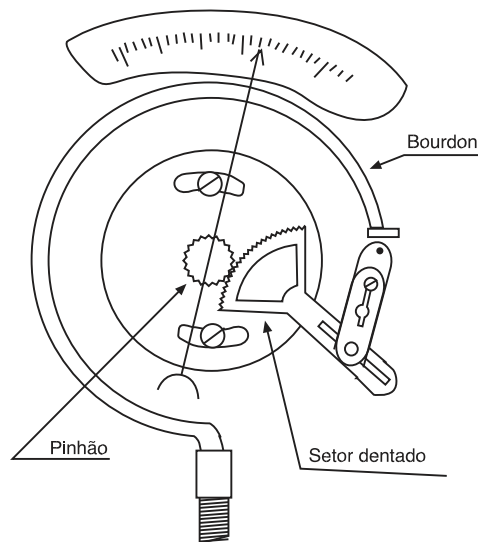
Os sensores sentem a variação do nível da água e enviam um sinal elétrico para o sistema de controle, indicando a variação desta grandeza. Os mais utilizados são o sensor de nível com eletrodos e o sensor de nível com boias (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.8.3 Sistema de medição da pressão

O instrumento mais utilizado para esta atividade é o manômetro, que é capaz de medir a pressão em sistemas fechados. O manômetro mais utilizado é o de Bourdon. Este é constituído de um tubo de formato “C”, recebe a pressão em uma extremidade, enquanto a outra permanece fechada (ANDRADE, 2018).

Seu funcionamento é simples, ao entrar em contato com uma pressão o tubo sofre dilatação, fazendo com que sua extremidade fechada movimente-se, e suas engrenagens recebem esta energia, resultando na movimentação do ponteiro proporcional à pressão exercida (ANDRADE, 2018). A parte interior de um manômetro de Bourdon é mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Interior do manômetro de Bourdon



Fonte: (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.8.4 Sistemas de medição de temperatura

Para desempenhar a medição da temperatura, é comumente utilizado o termopar. Este é formado de dois metais diferentes, unidos nas extremidades e conectados a um dispositivo com capacidade termopar, como um termômetro (OMEGA, s.d.)

Seu princípio de funcionamento está no efeito Seebeck, que consiste no surgimento de corrente contínua em um termopar, quando uma de suas extremidades é aquecida. Deste modo, sua tensão Seebeck aparece em função da temperatura dos metais que compõem o termopar, e é relacionada de volta para temperatura através do termômetro (OMEGA, s.d.)



### **6.8.5 Sistemas de medição de vazão**

O instrumento utilizado no sistema de medição de vazão deve ser capaz de medir a taxa de vazão de um líquido ou gás, esta pode ser linear ou não (OMEGA, s.d.).

Segundo Nogueira et al (2005) é possível fazer um comparativo entre os principais tipos de medidores utilizados, estes o rotâmetro, pressão diferencial, turbina e magnético.

O medidor rotâmetro é utilizado em líquidos e gases, com uma precisão de 2%, escala linear e logarítmica, tem custo baixo, apresenta uma difícil transmissão e fragilidade.

O medidor de pressão diferencial é utilizado em líquidos e gases, com uma precisão de 1%, escala quadrática, custo médio, é o modelo mais utilizado, porém possui um range limitado.

O medidor de turbina é utilizado em líquidos e gases, com uma precisão de 0,5%, escala linear, custo médio, não trabalha bem com fluidos viscosos e necessita de calibração periódica.

O medidor magnético é utilizado em líquidos, com uma precisão de 0,5%, escala linear, com custo elevado, opera bem com líquidos viscosos e apresenta baixa perda de carga (NOGUEIRA et al, 2005).

## **6.9 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR**

A distribuição do vapor produzido em locais distantes de onde será utilizado ocorre por meio das linhas de vapor. Estas que em seu dimensionamento deve-se considerar uma série de cargas, dentre as quais a pressão interna e externa, o peso da linha, do fluido e dos acessórios, limitação das sobrecargas, materiais com especificação adequada, isolamento térmico, impactos e vibrações no decorrer de seu funcionamento (NOGUEIRA et al, 2005).

### **6.9.1 Aspectos das instalações industriais**

Existem alguns cuidados que devem ser levados em consideração quando se estuda a segurança das instalações industriais. Para tanto, é recomendado instalar válvulas de retenção que por sua vez facilitam a manutenção e agem de modo a assegurar que o processo seja paralisado em caso de mal funcionamento (NOGUEIRA et al, 2005).

### 6.9.1.1 Purgadores de vapor

Nogueira et al (2005) esclarece que os purgadores de vapor são dispositivos automáticos cuja função é eliminar os condensados, ar e outros gases incondensáveis presentes nas tubulações de vapor e aparelhos de aquecimento sem deixar que o vapor escape.

Estando presente em equipamentos de aquecimento de vapor como serpentinas, aquecedores, estufas, etc., devem ser instalados na própria tubulação e o mais próximo possível da saída do equipamento de modo a reter o vapor por mais tempo, expandindo a captação do calor (NOGUEIRA, et al, 2005).

Existem vários tipos de purgadores de vapor e sua seleção é feita considerando fatores como: pressão de descarga, ação corrosiva do vapor ou condensado, custo, vibrações da instalação, finalidade e temperatura de entrada. Para a determinação da pressão de entrada deve-se considerar as perdas de carga até a sua localização e as condições de pressão do vapor e do condensado, de modo que em caso de variações o purgador seja ajustado corretamente (NOGUEIRA, et al, 2005).

A quantidade de condensado que se elimina no processo é medida em função de um grande número de variáveis, sendo considerado no caso de tubulações a parcela de condensado formado por aquecimento no início da tubulação, pela perda de calor para o ambiente e parada operativa, que variam em função da temperatura externa. É de extrema importância a drenagem do condensado, tendo em vista que para trabalhar com a maior eficiência o vapor precisa estar o menos úmido possível, e com a alta demanda das caldeiras e seu tamanho cada vez mais compacto, a instalação de secadores e purgadores faz com que o desgaste da instalação também diminua (NOGUEIRA, et al, 2005).

### 6.9.2 Estruturas Isolantes

O isolamento térmico é fundamental para o bom funcionamento e proteção da estrutura, visto que reduz a perda de calor da tubulação para o ambiente, sendo necessário considerar diversos fatores para a sua aquisição, tais como: como temperatura da superfície a ser isolada, condutividade térmica, absorção de umidade, atentando-se para a sua espessura que determina além da perda, o custo da instalação (NOGUEIRA, et al, s.d.).

Segundo Nogueira et al (2005) existem quatro tipos principais de estrutura isolante, são eles:

- a) Isolantes Refletivos: Folhas metálicas, alumínio e aços inoxidáveis com grande poder refletivo e baixa absorção.
- b) Isolantes Fibrosos: Lãs de rocha e de vidro, feltro e madeira são materiais compactados de modo a não favorecer a condução e a convecção natural de calor.
- c) Isolantes granulares: Silicato de cálcio, magnésia e cortiça são aglomerados de modo a dificultar a movimentação do ar e transferência de calor.
- d) Isolantes celulares: Materiais como o aerogel de sílica, espumas plásticas ou de borracha, são porosos e preenchidos com diversos gases diminuindo a convecção.

Para determinar a espessura do isolante térmico existem três métodos, sendo o primeiro e segundo baseados na transferência de calor, normas de segurança do Ministério do Trabalho com relação à temperatura das paredes da tubulação, e o terceiro relaciona o investimento com as condições térmicas do sistema (NOGUEIRA, et al, 2005).

## 6.10 OPERAÇÃO DE GERADORES DE VAPOR

### 6.10.1 Placa de Identificação e normas de segurança

Segundo a norma NR-13 (Caldeiras, vasos de pressão e tubulação), toda caldeira deve conter de forma visível sua placa identificadora com o nome do fabricante, número de ordem, ano de fabricação, capacidade de produção de vapor, pressão máxima de trabalho admissível, área de superfície de aquecimento, código de projeto e ano de edição. É importante também que seja elaborado um histórico de funcionamento da mesma com os eventuais problemas e inspeções periódicas e obrigatório possuir um manual com os procedimentos de partidas e paradas, parâmetros de rotina, segurança, saúde e meio ambiente (NOGUEIRA, et al, 2005).

Para operar de forma segura, é preciso seguir alguns princípios:

- a) A pressão de trabalho deve ser menor do que a permitida no projeto, preservando os componentes da caldeira.
- b) Operadores qualificados e devidamente instruídos quanto ao manuseio das caldeiras.
- c) Sistema de controle do nível da água e válvula de segurança, evitando o superaquecimento e pressão elevada.

### 6.10.2 Procedimentos

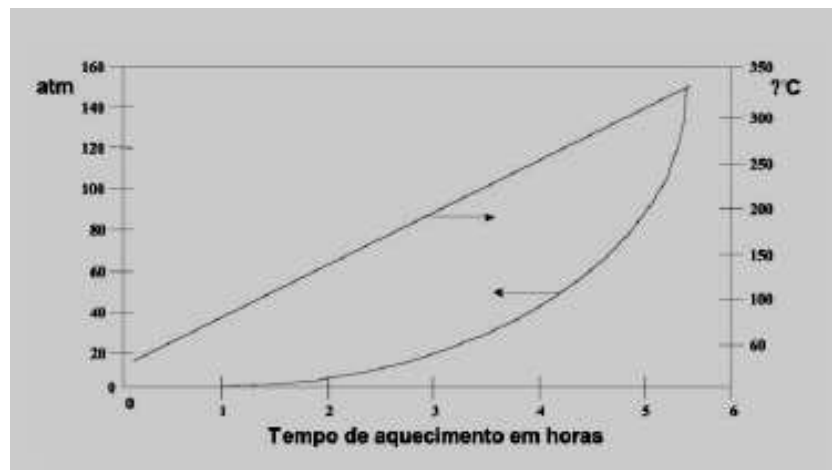
Serão listados os procedimentos de verificação de componentes e ligações das caldeiras em diversas situações, sendo elas:

#### 6.10.2.1 Partida

Antes da partida propriamente dita deve-se realizar uma série de inspeções, tais como: operação de ventiladores, registros e dutos, limpeza dos queimadores, calibração dos instrumentos de medição, válvulas e controle, portas de visita e inspeção fechadas, bomba de água de alimentação e sistema de óleo e combustível (NOGUEIRA, et al, 2005).

Após estas verificações, deve-se preencher a caldeira com água e ar de combustão para a fase de acendimento, além da eliminação dos condensáveis. Com a purga completada e a vazão de ar adequada, aciona-se os ignitores elétricos acendendo-se os queimadores, respeitando a curva temperatura vs tempo do equipamento, como apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Curvas de temperatura e pressão no processo de aquecimento de uma caldeira de médio porte e alta pressão



Fonte: (NOGUEIRA, et al, 2005).

#### 6.10.2.2 Parada

Existem dois modos de parada da caldeira, apresentados a seguir.

- a) Parada normal: Este tipo de parada acontece premeditadamente, ou seja, em final de expediente ou em caso de manutenção preventiva.

O processo de desligamento inicia-se com a redução das cargas, apagando-se os queimadores um a um, controlando a temperatura em cargas mais baixas. Em seguida, os queimadores deverão ser bloqueados, observando-se a existência de pressão residual após o fechamento da válvula *shutt-off*, de modo a não restar combustível dentro da fornalha. Por fim a caldeira deve ser isolada até seu total resfriamento, atendendo-se quando a pressão atingir 1,5 ou 2 kgf/cm<sup>2</sup>, onde os suspiros do tambor devem ser abertos para evitar a formação de vácuo na mesma (NOGUEIRA, et al, 2005).

b) Parada de emergência: Em caso de anormalidade a equipe responsável pelo funcionamento da caldeira deve agir rapidamente, evitando graves perdas. Existem algumas situações que podem requerer medidas de emergência, são elas: Perdas de nível de água que podem gerar aquecimento elevado na tubulação, nível de água elevado sobrecarregando o sistema de purgadores, explosão de fornalha, rompimento da tubulação devido à corrosão externa e temperatura elevada, ausência de combustível, perda rápida de carga, falta de ar de instrumentos, deficiência nos aquecedores de ar rotativos e retrocesso da chama. Para o caso de retrocesso, deve-se atentar à emissão de fumaça branca que pode representar misturas explosivas de fuligem ou gases com ar em excesso (NOGUEIRA, et al, 2005).

Com base nas possíveis causas de paradas, deve-se seguir um roteiro de vistoria diária que deve ser adaptado a cada calor específico, como pode ser observado nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Roteiro de vistoria diária 1

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

Fonte: (NOGUEIRA, et al, 2005).

Tabela 17 – Roteiro de vistoria diária 2

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

Fonte: (NOGUEIRA, et al, 2005).

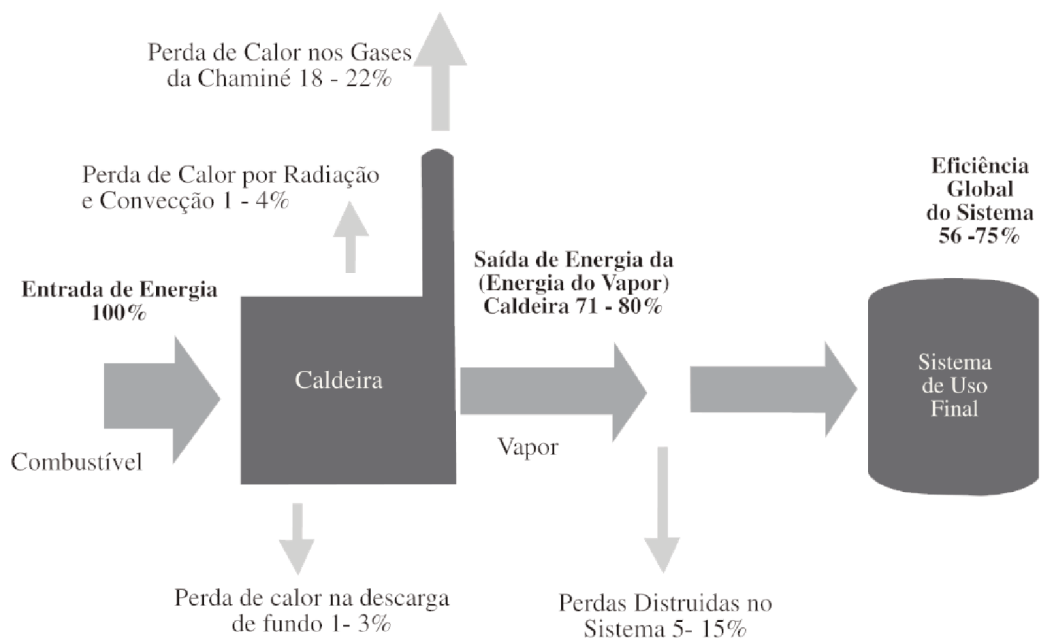
## 6.12 MEDIDAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE VAPOR

Atualmente nos sistemas de vapor, como em todos os sistemas industriais, o assunto eficiência energética cresce em função da necessidade em utilizar o recurso energia da melhor maneira possível, visto que cada vez mais aumenta a dificuldade em sua geração, e os custos vem se elevando proporcionalmente a esta dificuldade.

A ideia em elevar a eficiência energética do sistema de vapor, é fazer com que este opere o mais próximo possível da condição ideal, buscando reduzir perdas.

Segundo Nogueira et al (s.d.) as perdas podem ser identificadas por meio do balanço energético do sistema, incluindo ainda a visualização dos locais onde existem oportunidades de aplicação de medidas para o aumento da eficiência energética. A Figura 28 mostra um balanço energético de um sistema de vapor genérico.

Figura 28 – Balanço energético de um sistema de vapor genérico



Fonte: (NOGUEIRA et al, s.d).

### 6.12.1 Oportunidades de melhoria em um sistema de vapor genérico

Segundo Nogueira et al (s.d.) muitas oportunidades para aumentar a eficiência energética do sistema de vapor podem ser aplicadas em diversas instalações. E estas oportunidades são separadas de acordo com o local onde podem ser aplicadas. A Tabela 18 mostra as oportunidades e cada local onde podem ser aplicadas.

Tabela 18 – Oportunidades de melhorias na geração de um sistema de vapor genérico

<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>LOCAL APLICÁVEL</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Minimizar o excesso de ar.	Geração	Reduzir a quantidade de calor perdido nos gases de escape na chaminé, permitindo que maior quantidade de energia do combustível seja transferida para o vapor.
Limpar as superfícies de transferência de calor da caldeira.	Geração	Promover a efetiva transferência de calor dos gases de combustão para o vapor.
Instalar equipamentos de recuperação de calor (economizadores para a água)	Geração	Recuperar o calor disponível nos gases de exaustão e transferi-lo de volta para o sistema pelo pré-aquecimento da água de alimentação ou do ar de combustão.
Aperfeiçoar o tratamento de água, para minimizar as descargas de fundo da caldeira	Geração	Reduzir a quantidade total de sólidos dissolvidos na água da caldeira, o que permite reduzir as descargas e, portanto, perder menos energia.
Recuperar a energia da descarga de fundo da caldeira.	Geração	Transferir o calor disponível no fluxo da descarga de fundo da caldeira de volta para o sistema, reduzindo a perda de energia.
Adicionar / restaurar os refratários da caldeira.	Geração	Reduzir as perdas de calor da caldeira e restaurar a eficiência da caldeira.
Otimizar a taxa de descarga de vapor no desaerador.	Geração	Minimizar as perdas de calor evitáveis.
Consertar os vazamentos de vapor.	Distribuição	Minimizar as perdas de calor evitáveis.
Minimizar as descargas de vapor.	Distribuição	Minimizar as perdas de calor evitáveis.
Assegurar que as tubulações, válvulas, conexões e tanques do sistema de vapor estejam bem isolados.	Distribuição	Reduzir as perdas de energia das superfícies da tubulação e dos equipamentos.
Implementar programa efetivo de manutenção dos purgadores de vapor.	Distribuição	Reduzir a passagem de vapor vivo para o sistema de condensado e promover uma operação eficiente de transferência de calor no equipamento de uso final do vapor.
Isolar (bloquear) as linhas de vapor fora de uso.	Distribuição	Minimizar as perdas de calor evitáveis e reduzir perdas de energia das superfícies das tubulações e dos equipamentos.
Utilizar turbinas de contrapressão, ao invés de válvulas redutora de pressão.	Distribuição	Providenciar um método mais eficiente de redução da pressão de vapor para serviços de baixa pressão.
Otimizar a recuperação de condensado.	Recuperação	Recuperar a energia térmica do condensado e reduzir a quantidade de água de alimentação adicionada ao sistema, economizando energia e produtos químicos de tratamento.
Usar o condensado de alta pressão para produzir vapor de baixa pressão.	Recuperação	Explorar a energia disponível no condensado retornável.

Fonte: (Adaptado de NOGUEIRA et al, s.d).



## 6.12.2 Medidas de eficiência energética em um sistema específico

O estudo detalhado de um sistema de vapor fornece a informação para quais pontos há a oportunidade de aplicação de medidas de eficiência energética. Abaixo serão apresentadas algumas medidas.

### 6.12.2.1 Eficiência térmica do gerador de vapor

A eficiência térmica do gerador mostra a relação do calor útil e o calor fornecido pelo combustível, e ela é calculada por dois métodos distintos: o método direto e o método indireto (NOGUEIRA et al, s.d.). Este trabalho apresentará apenas o método direto.

#### 6.12.2.1.1 Método direto

O resultado do quociente entre a energia produzida pela caldeira e o consumo da energia do combustível é a eficiência calculada pelo método direto. A energia do vapor é o produto entre a vazão de massa de vapor e o ganho de entalpia da água de alimentação (NOGUEIRA et al, s.d.).

É necessário realizar medições para obter os valores para o vapor mostrados na equação (38), por meio desta mesmo calcula-se a eficiência térmica pelo método direto.

Alguns casos requerem medições específicas. O vapor superaquecido necessita da medição de vazão, temperatura e pressão, sendo estas duas últimas utilizadas para o cálculo da entalpia do vapor, enquanto em vapor saturado, apenas a pressão basta para sua determinação (NOGUEIRA et al, s.d.).

Uma outra variável do processo é a vazão da massa do combustível. Para determiná-la é necessária uma medição, que é complicada para combustíveis sólidos e simples para líquidos e gasosos (NOGUEIRA et al, s.d.).

$$\eta_{MD} = \frac{m_v(h_v - h_a)}{m_c \cdot PC} \quad (38)$$

Onde:

$\eta_{MD}$  = Eficiência térmica pelo método direto;

$m_v$  = Vazão em massa de vapor, em kg/s

$h_v$  = Entalpia do vapor produzido, em kJ/kg

$h_a$  = Entalpia da água de entrada, em kJ/kg

$m_c$  = Vazão em massa de combustível, em kg/s

PC = Poder calorífico do combustível, em kJ/kg

#### 6.12.2.2 Redução de excesso de ar e aumento na eficiência da combustão

Segundo Nogueira et al (s.d.) uma maneira de diminuir a perda de calor nos gases da chaminé é fazer com que a caldeira opere em um nível ótimo de excesso de ar, agregando ainda uma combustão mais eficiente e conseqüentemente gerando mais calor útil.

O excesso de ar é necessário para que haja a queima completa do combustível, uma vez que as condições da combustão nunca são adequadas, ou seja, na teoria uma quantidade de ar é necessária para uma determinada quantidade de combustível, porém na prática é necessária a adição do excesso de ar (NOGUEIRA et al, s.d.).

O nível de excesso de ar deve estar sempre no ótimo. Já que níveis acima ou abaixo acarretam em conseqüências. Em níveis baixos, o combustível não é completamente queimado, enquanto em níveis altos ocorrem perdas de calor, resultando na diminuição da eficiência do sistema como um todo. Desta maneira é necessária uma análise da concentração de oxigênio ou dióxido de carbono presentes nos gases da chaminé, para poder determinar a quantidade correta de excesso de ar (NOGUEIRA et al, s.d.).

Comumente as caldeiras ultrapassam o limite do nível ótimo, o que faz com que o monitoramento dos gases da chaminé e regularmente das caldeiras seja necessário. Para isso podem ser instalados analisadores de gases na chaminé que realizam a medição da porcentagem de oxigênio presente na chaminé de forma econômica. No caso dos sistemas em que o combustível ou fluxo de vapor são extremamente variáveis pode ser implantado um sistema de monitoramento e controle de oxigênio nos gases de saída (NOGUEIRA et al, s.d.). A Tabela 19 a seguir mostra a eficiência da combustão do gás natural relacionada ao excesso de ar.

Tabela 19 – Desempenho de uma caldeira utilizando gás natural como combustível

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

Fonte: (NOGUEIRA et al, s.d).

### 6.12.2.3 Redução das perdas de calor associadas a umidade no combustível

Segundo Nogueira et al (2005) a umidade presente nos combustíveis, principalmente em combustíveis sólidos, reduz o poder calorífico inferior dos mesmos. Essa redução ocorre devido a necessidade da água ser evaporada, retirando parte do calor para o processo de combustão, e diminuindo o calor útil. Por esse motivo, o ideal é utilizar combustíveis completamente secos para a geração de vapor, o que dificilmente acontece.

Deve-se portanto empregar combustíveis com baixa presença de umidade (NOGUEIRA et al, s.d.). A Tabela 20 mostra a relação do poder calorífico inferior da lenha com a influência da umidade.

Tabela 20 – Influência da umidade no poder calorífico da lenha.

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

Fonte: (NOGUEIRA et al, s.d).

#### 6.12.2.4 Utilização de um sistema de descarga de fundo

O sistema de descarga de fundo é utilizado para retirar periodicamente os resíduos sólidos, lodo ou incrustações que se acumulem no fundo da caldeira. São válvulas que atuam para a extração destes resíduos e mantém o funcionamento adequado do sistema. São empregadas mesmo com o tratamento da água, visto que resíduos ainda podem se formar, ou algum processo de tratamento pode apresentar defeito (NOGUEIRA et al, s.d.)

Segundo Nogueira et al (s.d.) apesar de ser fundamental, a descarga de fundo representa uma perda de calor, e pode ser minimizada com a redução dos sólidos na água por tratamento ou pode-se recuperar a energia que está presente na água da descarga de fundo.

A instalação de um trocador de calor ou um tanque de re-evaporação realizam o trabalho de recuperar o calor perdido. O tanque permite que parcela da descarga seja transformada em vapor de baixa pressão, que pode ser utilizada nos desaeradores (NOGUEIRA et al, s.d.)

#### 6.12.3 Fatores que afetam a eficiência

Segundo Nogueira, et al, (s.d.), a eficiência na distribuição de vapor é determinada em função da sua condução desde a caldeira até os pontos de utilização obtendo a menor perda possível. Deste modo, existem dois fatores que afetam esta condução, são eles: Perda durante o pré-aquecimento e perda em operação contínua. O primeiro está relacionado com o desligamento do sistema por tempo excessivo, o que faz com que toda a massa metálica esfrie, sendo necessário um gasto elevado com o reaquecimento do sistema. O segundo por sua vez está relacionado com as perdas nas tubulações e isolamentos durante a operação do sistema, sendo necessário para este caso a correta estrutura do sistema.

#### 6.12.4 Vazamento de vapor

Segundo Nogueira et al (s.d.) comumente encontram-se problemas com o vazamento de vapor nas indústrias causados principalmente pela falha na tubulação ou nos purgadores de vapor, que são mais difíceis de serem identificadas e solucionadas. As falhas nas tubulações ocorrem principalmente devido à má estruturação do projeto, corrosão, entre outros, como pode ser observado na Tabela 21 a seguir.

Tabela 21 – Perdas causadas por vazamentos

VAZAMENTO		PRESSÃO DE 7 KGF/cm <sup>2</sup> (PERDAS ANUAIS)	PERDAS DE ÓLEO COMBUSTÍVEL
Diâmetro (mm)	Superfície (mm <sup>2</sup> )	Toneladas de vapor	kg/ano
0,8	0,5	5	380
1,5	1,8	95	7.300,00
3	7	160	12.300,00
6	28	2.900,00	223.000,00

Fonte: (NOGUEIRA et al, s.d.)

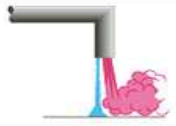



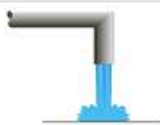
Os purgadores por sua vez, devem ser inspecionados de modo a identificar possíveis obstruções de passagem do condensado ou eventuais fugas de vapor para a linha de retorno do condensado. Existem quatro métodos básicos para testar os purgadores de vapor, sendo eles: temperatura, sonoro, visual e eletrônico. As Figuras 29 e 30 a seguir apresentam resumidamente o funcionamento das inspeções visualmente ou por som.

Figura 29 – Purgador operando apropriadamente

Purgador operando apropriadamente			
Ilustração			
Aparência	Pequeno volume do condensado descarregado	Vapor flash e condensado descarregado continuamente	Grande volume de condensado e vapor flash descarregado continuamente
Som	Quase sem som	Som similar a um apito	Apito mais forte
Purgador vazando			
Ilustração			
Aparência	Vapor vivo (transparente) de alta velocidade descarregado com condensado	Vapor vivo (transparente) de alta velocidade descarregado	Descarga contínua do vapor vivo (transparente) a alta velocidade
Som	Similar ao vazamento de ar comprimido	Similar ao vazamento de ar comprimido com um ligeiro apito	Apito mais forte

Fonte: (TVL, s.d.)

Figura 30 – Purgador operando inapropriadamente

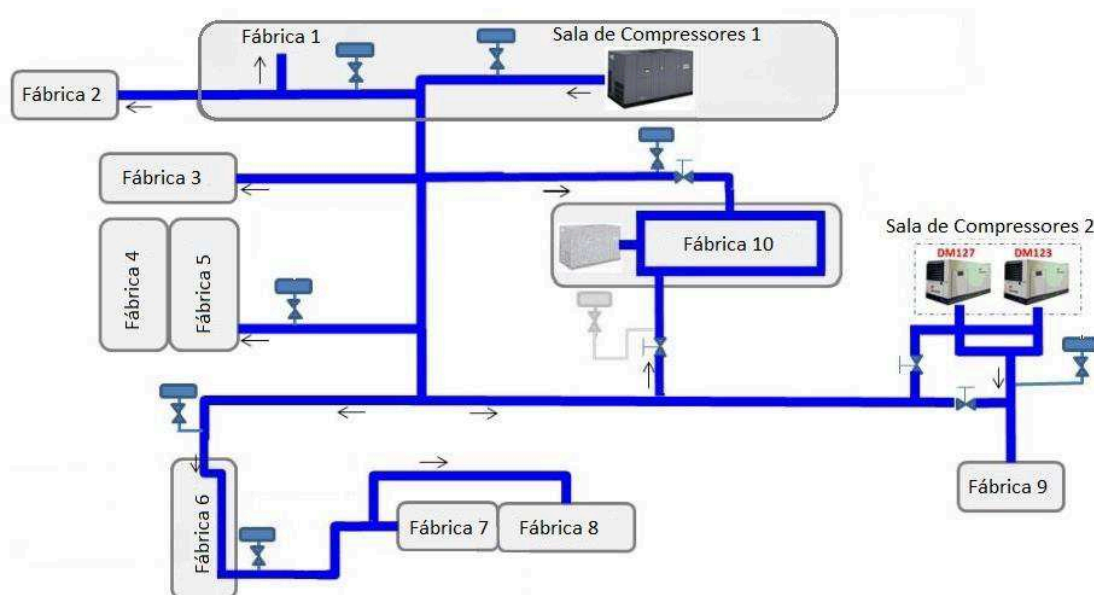
Purgador vazando			
Ilustração			
Aparência	Vapor vivo (transparente) de alta velocidade descarregado com condensado	Vapor vivo (transparente) de alta velocidade descarregado	Descarga contínua do vapor vivo (transparente) a alta velocidade
Som	Similar ao vazamento de ar comprimido	Similar ao vazamento de ar comprimido com um ligeiro apito	Apito mais forte
Purgador frio (bloqueado)		Capacidade insuficiente	
Ilustração			
Aparência	Nenhuma descarga de condensado ou vapor Baixa temperatura do purgador de vapor (Fácil de confundir com purgador fora de serviço)	Descarga suave (Capacidade de descarga é insuficiente)	
Som	Nenhum	Som bem baixo	

Fonte: (TVL, s.d).

## 7. ESTUDO DE CASO EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

Com o objetivo de aplicar as informações contidas neste trabalho visando a eficiência energética, estudou-se o sistema de ar comprimido de uma empresa metalúrgica multinacional, segmentado conforme a Figura 31.

Figura 31 – Fluxo de ar comprimido na empresa estudada



Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

O sistema de geração da empresa é composto por sete compressores divididos em duas salas. Na primeira sala, denominada “Sala de Compressores 1” estão instalados cinco compressores modelo Atlas Copco GA 160 tipo parafuso lubrificado à óleo, sendo que apenas quatro estão em funcionamento. Na outra sala, denominada “Sala de Compressores 2” estão instalados dois compressores, os quais não serão analisados neste estudo, visto que a primeira sala é a principal e alimenta a maioria dos galpões, enquanto a segunda alimenta apenas cargas separadas.

Todos os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio do sistema de gerenciamento de energias da empresa, bem como os pontos relatados pelo responsável pela manutenção.

A Tabela 22 contém os dados dos compressores da sala 1, utilizados neste estudo.

Tabela 22 – Especificações Compressores Sala 1

	Marca	Modelo	Tipo	Pressão Máxima de Operação (bar)	Capacidade Máxima (m <sup>3</sup> /min)	Potência do Motor (HP)	Status
Compressor 1	Atlas Copco	GA 160	Parafuso	7,4	31,7	215	Desligado
Compressor 2	Atlas Copco	GA 160	Parafuso	7,4	31,7	215	Em operação
Compressor 3	Atlas Copco	GA 160	Parafuso	7,4	31,7	215	Em operação
Compressor 4	Atlas Copco	GA 160	Parafuso	7,4	31,7	215	Em operação
Compressor 5	Atlas Copco	GA 160	Parafuso	7,4	31,7	215	Em operação

Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

A princípio, foram coletadas informações referentes ao funcionamento do sistema, como a captação do ar e o valor pago por kW/h, para que os ganhos fossem calculados aplicando-se a eficiência. São elas:

- O sistema não contempla tratamento adequado, inexistindo processos de secagem do ar comprimido.
- Não há monitoramento sobre os vazamentos e manutenção preventiva.
- O ar comprimido é resfriado por meio de troca de calor com a água.
- O sistema não contempla aftercooler.
- O ar aspirado pelo compressor vem do exterior.
- A empresa paga R\$ 0,36 por kW/h.
- O sistema não utiliza reservatórios.
- A pressão de trabalho do sistema é 7 bar.
- A vazão total de todas as fábricas é de 10.000 m<sup>3</sup>/h, porém nem todas operam simultaneamente, resultando em uma vazão média no sistema de 5.000 m<sup>3</sup>/h.

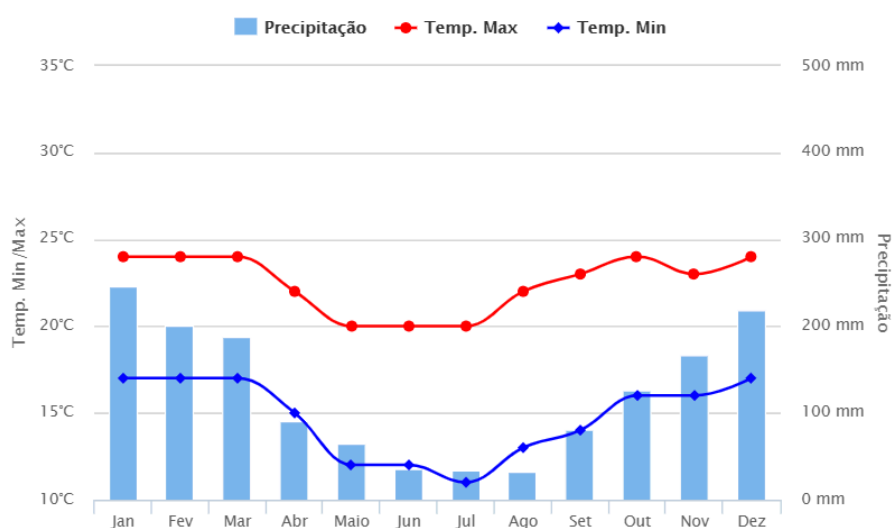
## 7.1 ESTUDO CLIMATOLÓGICO DO LOCAL EM QUE A EMPRESA ESTÁ INSTALADA

Dado que a empresa está instalada no interior de São Paulo, na região conhecida como Vale do Paraíba, a temperatura média na sala de compressores é de 50°C e o ar aspirado pelos compressores vem do exterior, é importante realizar um estudo da temperatura média da região em que a empresa está instalada para que se possa avaliar a necessidade de se aplicar medidas a fim de resfriar o interior da sala, e permitir que o compressor aspire ar com temperatura abaixo do exterior.



Estudos da CLIMATEMPO (s.d.) apontam as temperaturas médias mensais da cidade em que a empresa está situada, com base no período de 30 anos, como observado nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Estudo climatológico da cidade em que a empresa está instalada



Fonte: (CLIMATEMPO, s.d.)

Figura 33 - Estudo climatológico da cidade em que a empresa está instalada

Mês	Minima (°C)	Máxima (°C)	Precipitação (mm)
Janeiro	17°	24°	246
Fevereiro	17°	24°	200
Março	17°	24°	187
Abril	15°	22°	90
Maio	12°	20°	64
Junho	12°	20°	36
Julho	11°	20°	34
Agosto	13°	22°	32
Setembro	14°	23°	81
Outubro	16°	24°	126
Novembro	16°	23°	167
Dezembro	17°	24°	219

Fonte: (CLIMATEMPO, s.d.)

Segundo Climatempo (s.d.), a temperatura média desta cidade varia entre 18°C e 19°C, mais precisamente 18,6°C, que está baixo se comparado ao valor médio dos dados apresentados no item 6.8.2.2 deste trabalho, onde a temperatura considerada ideal é de 21°C.

Deste modo, conclui-se que existe uma economia no percentual de potência, não havendo a necessidade de se aplicar medidas para a redução da temperatura do ar aspirado pelo compressor.

## 7.2 PERCENTUAL DE VAZAMENTOS

Conforme dados relatados, a instalação possui aproximadamente 30 anos, não há controle sobre vazamentos e manutenção preventiva no sistema, de modo que os reparos são realizados quando observados ruídos nos dutos do mesmo.

Segundo afirmações de Rocha (2005) apresentadas no item 6.8.2.6 deste trabalho, uma instalação com mais de 15 anos pode apresentar percentuais de vazamentos de 20%, que é medido a partir do método descrito no item 6.8.2.6.1.

Como a empresa não possui reservatórios e não foi possível o desligamento dos dispositivos consumidores, foram utilizados os dados do Compressor 5 (Tabela 23) para os cálculos que se seguem.

Tabela 23 – Regime de operação do compressor 5, entre Janeiro e Outubro de 2018

	Horas em Carga (h)	Horas em Operação (h)
Compressor 5	2624,686	3363,36

Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

Cálculo do caudal do vazamento:

$$V_V = V_C \cdot \frac{\sum_{i=1}^m t_{ci}}{t_t}$$

$$V_V = 31,7 \cdot \frac{2624,686}{3363,360}$$

$$V_V = 24,74 \frac{m^3}{min}$$

Cálculo do percentual de perda por vazamentos:

566

$$V_{\%} = \frac{V_V}{\sum_{i=1}^c V_{Ci}} \cdot 100$$

$$V_{\%} = \frac{24,74}{31,7 + 31,7 + 31,7 + 31,7} \cdot 100$$

$$V_{\%} = 19,51\%$$

Para estimar o custo da perda por vazamentos, faz-se necessário o custo da operação anual dos compressores trabalhando em carga. A Tabela 24 contempla os dados referentes ao meses de janeiro a outubro de 2018 para as horas em carga e operação dos mesmos.

Tabela 24 – Regime de Operação dos Compressores da Sala 1 da Empresa estudada

	Horas em Carga (h)	Horas em Operação (h)
Compressor 1	Inoperante	Inoperante
Compressor 2	4897,637	5455,385
Compressor 3	1157,118	1262,855
Compressor 4	5820,019	6443,618
Compressor 5	2624,686	3363,36

Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

1. Cálculo do custo dos compressores trabalhando em carga de janeiro a outubro de 2018:

a. Convertendo a potência dos compressores de 215 HP para 160 kW.

$$C_c = \left[ \sum_{i=1}^n (P_{cc_i} \cdot t_{cc_i}) \right] \cdot C_{kWh}$$

$$C_c = [(160.4897,637) + (160.1157,118) + (160.5820,019) + (160.2624,686)]. 0,36$$

$$C_c = 2319913,6.0,36$$

$$C_c = 835.168,896 R\$/a$$

2. Cálculo do custo da perda por vazamentos:

$$C_V = C_c \cdot \frac{V_{\%}}{100}$$

$$C_V = 835168,896 \cdot \frac{19,51}{100}$$

$$C_V = 162.941,452 \text{ R\$/a}$$

### 7.2.1 Análise dos custos das perdas

Considerando a idade da instalação e a ausência de manutenção preventiva, o custo calculado condiz com o exposto ao longo do trabalho. Somando-se aos motivos mencionados, o fato dos vazamentos serem detectados apenas quando causam sinais sonoros incômodos contribui para o crescimento das perdas, visto que permanecem no sistema por tempo indeterminado, o que resulta em um período maior de trabalho do compressor para compensar as perdas e não afetar o consumo final.

Constata-se ainda que o sistema carece de aftercooler ou secadores (que serão abordados posteriormente), o que possibilita a retirada da umidade do ar comprimido evitando a permanência do condensado nas instalações, ocasionando corrosão e consequentes vazamentos.

### 7.2.2 Medidas propostas e porcentagem de redução

Com base nos itens anteriores, propõem-se como medida viável economicamente o planejamento da manutenção preventiva das tubulações, totalizando duas horas de inspeção semanal, além da conscientização dos operadores para a sinalização dos pontos de possíveis vazamentos.

Espera-se com a adoção dessas medidas a redução da porcentagem de vazamentos para 15%, demonstrado a seguir, estimando que o valor homem/hora que atua na manutenção da empresa estudada é de R\$ 70,00.

Cálculo da perda por vazamentos com a estimativa de 15% de percentual:

$$C_V = C_c \cdot \frac{V_{\%}}{100}$$

$$C_V = 835168,896 \cdot \frac{15}{100}$$

$$C_V = 125.275,334 \text{ R\$/a}$$

O ganho estimado da medida é mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Estimativa de ganho com a implementação da manutenção preventiva

	Sem Manutenção Preventiva		Com Manutenção Preventiva		Resultados	
Custo de perdas por vazamentos	R\$	162.941,45	R\$	125.275,33	R\$	37.666,12
Custo Homem/hora Semanal (Período de 10 meses)	R\$	-	R\$	5.600,00	-R\$	5.600,00
Ganho do Período de janeiro a outubro		-		-	R\$	32.066,12

Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

### 7.2.3 Vantagens de utilização de um aftercooler e secador

#### 7.2.3.1 Aftercooler

Considerando a inexistência de um aftercooler no sistema analisado, lista-se a seguir as principais vantagens de utilização do mesmo (ARCOMPRESSO BRASIL, s.d.)

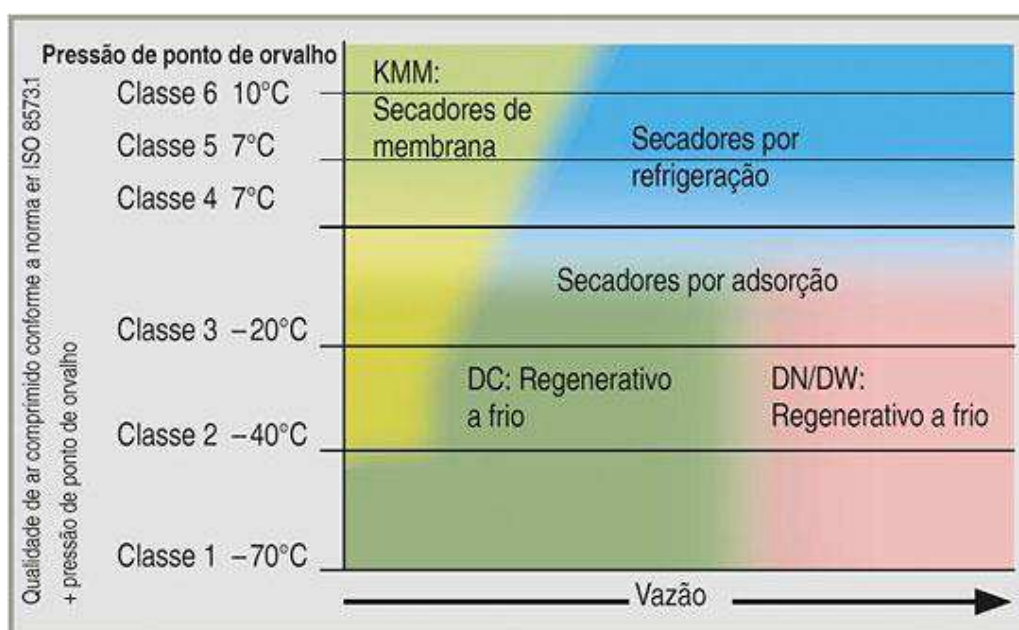
- O aftercooler tem por objetivo a retirada da água e condensados do sistema deixando-o próprio para a posterior filtragem e secagem.
- Ele resfria o ar comprimido e possui elevada eficiência térmica devido ao fluxo oposto ao da água.
- É um equipamento de fácil manutenção e compacto.

### 7.2.3.1 Secador

Empresas que trabalham com atividades pneumáticas, utilizam compressores diariamente. No sistema de ar comprimido é importante que sejam instalados após os aftercoolers, os secadores de ar, para que a água seja eliminada, deixando o ar praticamente seco e aplicável às funções industriais (AGERADORA, 2016).

A Figura 34 a seguir apresenta um gráfico com as aplicações dos diferentes tipos de secadores em função da pressão de ponto de orvalho.

Figura 34 – Secador de ar comprimido



Fonte: (KAESER, s.d.).

Os secadores de membrana são recomendados para aplicações em espaços confinados, quando necessária secagem adicional ou no caso de menores volumes de ar (KAESER, S.d.).

Os secadores regenerativos a frio são utilizados em sistemas que trabalham com temperaturas a baixo de zero e que requerem ar excepcionalmente seco, como no caso de indústrias alimentícias e farmacêuticas.

Os secadores por refrigeração são utilizados para condições em que a pressão de orvalho mínima seja de 3 °C.

### 7.3 ENERGIA RECUPERADA

Conforme mencionado no item 5.8.2.4, segundo Rocha e Monteiro (2005) apenas uma parte da energia utilizada na compressão permanece no ar comprimido, sendo que os 94% perdidos podem ser recuperados com a instalação de trocadores de calor, como no caso de sistemas refrigerados por água.

Como o resfriamento do ar comprimido na empresa ocorre através da troca de calor com a água, que não é reutilizado, pode-se inferir que esta deve buscar oportunidades para a recuperação da energia térmica perdida na compressão, seja para aquecimento dos chuveiros dos funcionários ou pré-aquecimento de fluidos.

#### 7.3.1 Ganho da instalação dos trocadores de calor

Considerando que os quatro compressores em operação somam uma potência instalada de 640 kW (160kW por compressor) e pressupondo que 90% da energia utilizada na compressão poderá ser recuperada, calcula-se o ganho com a instalação dos trocadores de calor.

$$\text{Potencial de Energia} = \text{Pot}_{\text{compressor}} \cdot 0,90$$

$$\text{Potencial de Energia} = 160 \cdot 0,90$$

$$\text{Potencial de Energia} = 144 \text{ kW}$$

Conforme dados apontados no item 5.8.2.4 por Rocha e Monteiro (2005), é possível estimar a quantidade de energia recuperada por cada compressor em seu respectivo regime de operação (de janeiro a outubro de 2018) mostrados na Tabela 24.

A quantidade de energia estimada é mostrada na Tabela 26 indicando as faixas de operação, sendo o compressor 2 operando à 5.000 horas, o compressor 3 operando à 1.000 horas, o compressor 4 operando à 6.000 horas e o compressor 5 operando à 3.000 horas.

Tabela 26 – Valores estimados de energia recuperável por compressor

	DLE (m <sup>3</sup> /min)	Taxa de Calor (kW)	Quantidade Ganha em Horas de Operação (kWh/ano)
Compressor 2	31,7	144	720.000
Compressor 3	31,7	144	144.000
Compressor 4	31,7	144	864.000
Compressor 5	31,7	144	432.000
Total	-	-	2.160.000

Fonte: (CONSOLINO e CARVALHO, 2018).

A quantidade de energia que pode ser reaproveitada é de 2,16 GWh/ano. O estudo detalhado de todos os processos da empresa permite a análise em quais aplicações esta energia pode ser reaproveitada, além de ser possível estimar os ganhos financeiros.

O ganho financeiro estimado é calculado a seguir:

$$Economia = 2.160.000 \times 0,36$$

$$Economia = 777.600 \text{ R\$/ano}$$



## 8 CONCLUSÃO

O uso eficiente da energia nos sistemas industriais torna as empresas mais competitivas e atraentes na oferta de seus produtos para o mercado, visto que a consciência ambiental vem aumentando ao longo dos anos. Dentre os diversos sistemas industriais existentes, estudou-se neste trabalho o ar comprimido e vapor, apresentando medidas para a redução dos custos e promoção da eficiência energética.

Dentre as medidas apresentadas para os sistemas que utilizam ar comprimido é possível concluir que o maior ganho ocorre a partir da recuperação da energia térmica que é perdida na compressão, totalizando cerca de 90% e que os vazamentos refletem um grande problema para os sistemas de ar comprimido, sendo imprescindível o tratamento adequado do ar e a manutenção preventiva para a sua minimização e aumento da eficiência energética.

No sistema de vapor, observou-se que a presença da umidade reduz o poder calorífico dos combustíveis, tornando-se importante a verificação e eliminação da mesma quando detectada. O tratamento da água de alimentação das caldeiras, principalmente pelo processo de desmineralização, reduz a entrada de sais minerais, resultando na diminuição de incrustações que comprometem a eficiência térmica.

Após as análises gerais dos sistemas, efetuou-se um estudo de caso em um sistema de ar comprimido e observou-se um percentual coerente quanto aos vazamentos do sistema, visto que a instalação é antiga e não há controle de vazamentos. Somado aos estudos anteriores, contactou-se também que o sistema carece de um sistema de secagem, o que é extremamente necessário, visto que a umidade do ar pode reduzir a vida da instalação além de reduzir a qualidade do ar. Tratando-se de rentabilidade, o resultado mais significativo foi observado na recuperação da energia térmica perdida na compressão. A empresa resfria os compressores com água, mas esta é descartada, não sendo utilizada em outros processos, nem para aquecimento de outros fluídos. Desse modo, a instalação de trocadores de calor e também o estudo dos processos da empresa para destinação adequada do calor da água, podem gerar medidas para a recuperação de 2,16 GWh/ano, atingindo o objetivo inicial deste trabalho.

Sendo assim, espera-se que este trabalho influencie pesquisas posteriores de eficiência energética a partir das informações apresentadas dos sistemas de vapor, além de outros sistemas importantes como o bombeamento, refrigeração industrial e comercial.

## REFERÊNCIAS

ABESCO. **O que é Eficiência Energética (EE)**. s.d. Disponível em: < <http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>> Acesso em: 13 abr. 2018.

ABRADEE. **Tarifas de Energia**. s.d. Disponível em: < <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>> Acesso em: 14 abr. 2018.

AGERADORA. **Qual é a função do secador de ar para o compressor**. 2016. Disponível em: < <https://www.ageradora.com.br/qual-funcao-do-secador-de-ar-para-o-compressor/> > Acesso em: 28 out. 2018.

ANDRADE, F. **Manômetro de pressão – Tipos, funcionamento, aplicação e tudo mais**. 2018. Disponível em: <<https://automacaoecartoons.com/2018/03/06/manometro-de-pressao/>> Acesso em: 06 out. 2018.

ANEEL. **Entendendo a tarifa**. 2017. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa/-/asset\\_publisher/uQ5pCGhnyj0y/content/composicao-da-tarifa/654800?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fentendendo-a-tarifa%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_uQ5pCGhnyj0y%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_stat%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D2](http://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa/-/asset_publisher/uQ5pCGhnyj0y/content/composicao-da-tarifa/654800?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fentendendo-a-tarifa%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_uQ5pCGhnyj0y%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_stat%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2)> Acesso em: 27 mai. 2018.

ANEEL. **Por dentro da conta de luz: informação de utilidade pública**. 2008. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha\\_1p\\_atual.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_1p_atual.pdf)> Acesso em: 24 jul. 2018.

ARCOMPRESSÃO BRASIL. **Aftercooler**. s.d. Disponível em: < <https://www.arcomprimido.com.br/aftercooler/>> Acesso em: 28 out. 2018.

ARCOMPRESSÃO BRASIL. **Purgador automático eletrônico**. s.d. Disponível em: <<https://cdn.awsli.com.br/294/294998/arquivos/Purgadores%20para%20Ar%20Comprimido%20-%20Arcomprimido%20Brasil%20-%202011%202307-5239.pdf>> Acesso em: 10 ago. 2018.

ARCOMPRESSÃO BRASIL. **Purgador para linha de ar comprimido**. s.d. Disponível em: <<https://www.arcomprimido.com.br/pagina/purgador-para-linha-de-ar-comprimido.html>> Acesso em: 02 jul. 2018.

BFILTERS. **Abrandamento de água dura: Entenda como funciona esse processo**. 2017. Disponível em: <<http://bfilters.com.br/abrandamento-de-agua-dura/>> Acesso em: 18 set. 2018.

BOSCH. **Tecnologia de ar comprimido.** 2008. Disponível em: <[http://bosch.com.br/br/ferramentas\\_pneumaticas/produtos/downloads/ManualPneumatica\\_ARComprimido.pdf](http://bosch.com.br/br/ferramentas_pneumaticas/produtos/downloads/ManualPneumatica_ARComprimido.pdf)> Acesso em: 23 mai. 2018.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética.** Brasília – DF: MME, 2011. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863>> Acesso em: 07 abr. 2018.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília – DF: MME, 2007. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica.pdf>> Acesso em: 10 abr. 2018.

BUCUSSI, A. A. **Textos de apoio ao professor de física.** v.17, n.3. Porto Alegre: UFRGS, 2006. Disponível em: <[https://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n3\\_Bucussi.pdf](https://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n3_Bucussi.pdf)> Acesso em: 03 mar. 2018.

CAPELLI, A. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais.** São Paulo: Érica/Saraiva, 2017.

CÔMERC ENERGIA. **O Mercado livre de energia.** s.d. Disponível em: <[https://www.comerc.com.br/comerc/o\\_mercado\\_livre\\_de\\_energia.asp](https://www.comerc.com.br/comerc/o_mercado_livre_de_energia.asp)> Acesso em: 27 mai. 2018.

COMUSA. **Tratamento de água.** 2017. Disponível em: <<http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>> Acesso em 18 set. 2018.

CONPET. **Conpet.** 2012. Disponível em: <[http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt\\_br/conteudo-gerais/conpet.shtml](http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/conpet.shtml)> Acesso em: 12 abr. 2018.

FESTO. **Informe técnico: Processos para a indústria alimentícia garantidos pela qualidade do ar comprimido.** 2015. Disponível em: <[https://www.festo.com/rep/pt-br\\_br/assets/pdf/white\\_paper\\_food\\_safety\\_BR\\_2015\\_Sept.pdf](https://www.festo.com/rep/pt-br_br/assets/pdf/white_paper_food_safety_BR_2015_Sept.pdf)> Acesso em: 24 mai. 2018.

FOGAÇA, J. **Equação geral dos gases.** s.d. Disponível em: <<https://manualdaquimica.uol.com.br/quimica-geral/equacao-geral-dos-gases.htm>> Acesso em 28 jun. 2018.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial.** Rio de Janeiro – RJ: Interciência, 2002.

GUEDES, J. C. S. **Manual de tarifação da energia elétrica.** Rio de Janeiro - RJ: PROCEL, 2011. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20El%20-%20Procel\\_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20El%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf)> Acesso em: 10 jul. 2018.

HAHN, A. **Compressores: guia avançado.** Rio de Janeiro – RJ: PROCEL, 2004.

INMETRO. **O programa brasileiro de etiquetagem.** S.d. Disponível em: <[http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca\\_o\\_programa.php](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php)> Acesso em: 12 abr. 2018.

JÚNIOR, J. S. D. S. **O que é pressão.** Brasil Escola, s.d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-pressao.htm>> Acesso em: 28 jun. 2018.

JÚNIOR, J. S. D. S. **O que é temperatura.** Brasil Escola, s.d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-temperatura.htm>> Acesso em: 10 jul. 2018.

KAESER. **Secador de ar comprimido.** s.d. Disponível em: <[http://www.kaeser.com.br/Products\\_and\\_Solutions/Compressed-air-treatment/Drying/default.asp](http://www.kaeser.com.br/Products_and_Solutions/Compressed-air-treatment/Drying/default.asp)> Acesso em: 28 out. 2018.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Princípio de funcionamento de um desareador.** s.d. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/266-principio-de-funcionamento-de-um-desareador/>> Acesso em: 29 set. 2018.

MORAES, P. T. **Composição do ar.** s.d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/composicao-do-ar.htm>> Acesso em: 05 abr. 2018.

NOGUEIRA, L. A. H; ROCHA, C. R; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência energética no uso do vapor.** Rio de Janeiro - RJ: Eletrobrás/PROCEL, 2005.

NOGUEIRA, L. A. H; ROCHA, C. R; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência energética no uso do vapor: Manual prático.** Rio de Janeiro - RJ: Eletrobrás/PROCEL, s.d.

OMEGA. **Medidores de vazão:** Introdução aos medidores de vazão. s.d. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/medidores-de-vazao.html>> Acesso em: 07 out. 2018.

OMEGA. **Saiba o que é um termopar.** s.d. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>> Acesso em: 06 out. 2018.

ROCHA, C. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido:** Manual prático. Rio de Janeiro – RJ: Eletrobrás/PROCEL, s.d.

ROCHA, N. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido.** Rio de Janeiro – RJ: Eletrobrás, 2005.

ROLLINS, J.P. **Manual de ar comprimido e gases.** São Paulo – SP: Pearson / Prentice Hall, 2004.

S.A. **Energia para o século XXI:** Por uma nova política energética no Brasil. 2012. Disponível em: <[http://fmclimaticas.org.br/wp-content/uploads/2014/03/Energia\\_para\\_o\\_seculo\\_XXI-texto.pdf](http://fmclimaticas.org.br/wp-content/uploads/2014/03/Energia_para_o_seculo_XXI-texto.pdf)> Acesso em: 03 abr. 2018.

SÁ, A. F. R. **Sistemas de ar comprimido:** medidas para aumentar a eficiência energética. 2009. Disponível em: <<https://www.voltimum.pt/artigos/sistemas-de-ar-comprimido-medidas-para>> Acesso em: 02 jul. 2018.

SILVA, M. N. P. **Unidades de medida de volume.** s.d. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/matematica/unidades-medida-volume.htm>> Acesso em: 25 out 2018.

SILVA, R. B. **Geradores de vapor de água (Caldeiras).** São Paulo – SP: USP, 1957.

SOUSA, J. V. P. **A lógica do pensamento.** 2017. Disponível em: <<http://engjosevilmar.blogspot.com/2017/08/entendimento-aplicacao-e-funcionamento.html>> Acesso em: 08 set. 2018.

SOUZA, L. A. **Poder calorífico de combustíveis.** s.d. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/poder-calorifico-combustiveis.htm>> Acesso em: 02 set. 2018.

TOFOLLI, L. **Transformações Gasosas.** s.d. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/termodinamica/transformacoes-gasosas/>> Acesso em: 02 set. 2018.

TOGAWA, V. **Alimentação de água da caldeira.** s.d. Disponível em: <<http://togawaengenharia.com.br/blog/alimentacao-de-agua-da-caldeira/>> Acesso em: 08 set. 2018.

TVL. **Guia para inspeção do purgador de vapor.** s.d. Disponível em: <<https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/steam-trap-test.html>> Acesso em: 12 out. 2018.

WAGNER, F. **Como funciona uma caldeira?** 2012. Disponível em: <<http://www.rwengenharia.eng.br/como-funciona-uma-caldeira/>> Acesso em: 01 set. 2018.