



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**IGOR SOUZA PONTES**

**LUAN BEZERRA DOS SANTOS**

**LUÍS FELIPE SILVA GUARNIERI**

**GERENCIAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE AR  
COMPRIMIDO**

**VOLTA REDONDA**

**2020**

**IGOR SOUZA PONTES**

**LUAN BEZERRA DOS SANTOS**

**LUÍS FELIPE SILVA GUARNIERI**

**GERENCIAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE AR  
COMPRIMIDO**

Dissertação apresentada ao ENGENHARIA  
MECÂNICA do Centro Universitário de Volta  
Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para  
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes  
Habibe

**VOLTA REDONDA**

**2020**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

P813g Pontes, Igor Souza.

Gerenciamento energético em sistemas de ar comprimido. / Igor Souza Pontes; Luan Bezerra dos Santos; Luís Felipe Silva Guarnieri. – Volta Redonda: UniFOA, 2020.

93 p. II

Orientador (a): prof. DSc. Alexandre Fernandes Habibe

Monografia (TCC) – UniFOA / Curso de Engenharia Mecânica, 2020.



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



ENGENHARIA MECÂNICA

LUAN BEZERRA DOS SANTOS

IGOR SOUZA PONTES

LUÍS FELIPE SILVA GUARNIERI

GERENCIAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“ENGENHEIRO MECÂNICO”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE ENGENHARIA  
MECÂNICA

Prof. MSc. Diniz Felix dos Santos  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. DSc. ALEXANDRE FERNANDES HABIBE**  
1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

---

**Prof. DSc. ALEXANDRE ALVARENGA PALMEIRA**  
2º Membro da banca/UniFOA

---

**Prof. MSc. RUI AURELIO BARBOSA**  
3º Membro da banca/UniFOA

Junho de 2020.

**SANTOS, L. B. DOS.; PONTES, I. S.; GUARNIERI, L. F. S. GERENCIAMENTO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO. 2020. DISSERTAÇÃO (ENGENHARIA MECÂNICA) – FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA, CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA, VOLTA REDONDA, 2020.**

## **RESUMO**

Tendo em vista a tamanha importância dos sistemas de ar comprimido nas mais variáveis indústrias, torna-se essencial a análise crítica de tal sistema, enfatizando a perda de energia existente devido aos mais diversos fatores geradores de ineficiência, que serão abordados neste trabalho. Estando tal perda diretamente conectada ao potencial de energia elétrica consumido de maneira excessiva, o estudo das melhorias em um determinado sistema de ar comprimido torna-se indispensável para a redução de um significativo prejuízo. Visto que muitos sistemas nunca foram submetidos à uma análise deste modo, a energia elétrica em excesso atuante na compressão do fluido, em função do consumo específico de energia dos compressores, pode estar atingindo valores substanciais ao longo dos últimos anos, conforme abordagem realizada neste trabalho. Além do descrito anteriormente, também será levado em consideração a apropriada utilização do ar comprimido em sua aplicação final, contemplando as cabíveis manutenções dos equipamentos, tubulações e acessórios, e principalmente no treinamento dos operadores que não de estar diretamente ligados à tal aplicação, pois, nas aplicações finais, encontram-se as maiores partes dos vazamentos, ou seja, a maior parte dos gastos excessivos e desperdícios.

**Palavras-chave:** energia, compressores, desperdícios

SANTOS, L. B. dos.; PONTES, I. S.; GUARNIERI, L. F. S. **COMPRESSED AIR SYSTEMS' ENERGY MANAGEMENT**. 2020. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

## **ABSTRACT**

Owing to the fact of compressed air systems matters in the most variable type of industry, the critical analysis of the respective system is essential, aiming to the energy loss generated by the many inefficiency generators factors, which will be discussed in this work. As this direct loss is related to the potential of electrical energy consumed in an excessive way, the study of improvements in a determined compressed air system becomes indispensable for a significant money loss reduction. Since many systems have never been submitted to an analysis in this way, the excess electrical energy acting on the fluid's compression, depending on the specific energy consumption of the compressors, may be reaching substantial values over the last few years, as approached in this work. In addition to the previously described, the appropriate use of compressed air in its final application will also be taken into account, including the appropriate maintenance of equipment, piping and accessories, beyond an especially training of operators who will be directly connected to such application, since most of leaks are found in its final applications, meaning the most excessive expenses and waste.

**Keywords:** energy, compressors, leaks

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquematização da Compressibilidade do Ar .....	18
<b>Figura 2.</b> Esquematização da Elasticidade do Ar .....	19
<b>Figura 3.</b> Esquematização da Difusibilidade do Ar .....	19
<b>Figura 4.</b> Esquematização da Expansibilidade do Ar .....	20
<b>Figura 5.</b> Balões com o mesmo peso em equilíbrio em uma balança de precisão. .....	21
<b>Figura 6.</b> Ar de um dos balões sendo removido por bomba de vácuo.....	21
<b>Figura 7.</b> Balões em desequilíbrio em função do peso existente no ar. ....	22
<b>Figura 8.</b> Subcamadas da atmosfera e seus respectivos raios .....	22
<b>Figura 9.</b> Barômetro de Torricelli .....	24
<b>Figura 10.</b> Carta psicrométrica .....	27
<b>Figura 11.</b> Compressor de ar para aplicações simples.....	29
<b>Figura 12.</b> Compressor de ar Worthington para aplicações industriais .....	29
<b>Figura 13.</b> Sistema de Ar Comprimido.....	30
<b>Figura 14.</b> Esquematização dos diversos tipos de compressores de acordo com seus princípios de trabalho.....	31
<b>Figura 15.</b> Compressor Centrífugo Radial .....	33

<b>Figura 16.</b> Compressor Dinâmico de Fluxo Radial .....	34
<b>Figura 17.</b> Compressor Axial .....	35
<b>Figura 18.</b> Compressor de Palhetas .....	36
<b>Figura 19.</b> Compressor Espiral .....	36
<b>Figura 20.</b> Compressor de Lóbulos .....	37
<b>Figura 21.</b> Compressor tipo Roots.....	38
<b>Figura 22.</b> Ciclo de Trabalho de um Compressor de Parafuso.....	39
<b>Figura 23.</b> Corte parcial em um compressor de parafuso.....	40
<b>Figura 24.</b> Ciclo de Trabalho de Compressores tipo Tronco .....	41
<b>Figura 25.</b> Ciclo de Trabalho de um Compressor de Pistão de Duplo Efeito...	42
<b>Figura 26.</b> Pistão de Simples Efeito à esquerda e Pistão de Duplo Efeito à direita .....	43
<b>Figura 27.</b> Sistema de refrigeração a água em um compressor de dois estágios e duplo efeito.....	45
<b>Figura 28.</b> Diagrama esquemático de um volume de controle.....	48
<b>Figura 29.</b> Esquema de transferência de energia ao gás .....	51
<b>Figura 30.</b> Diagrama de Blocos .....	58
<b>Figura 31.</b> Perdas comuns em um sistema de ar comprimido.....	65
<b>Figura 32.</b> Custo efetivo de um compressor ao longo de 10 anos de uso.....	70

**Figura 33.** O calor como produto natural da compressão, energia que pode ser recuperada na forma de água quente pelo sistema de resfriamento do compressor..... 83

**Figura 34.** Circuito de ar comprimido..... 84

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Variação da pressão atmosférica em relação à altitude.....	23
<b>Tabela 2.</b> Recomendações em função do percentual de umidade (%).....	28
<b>Tabela 3.</b> Variação do consumo com a temperatura de aspiração .....	68
<b>Tabela 4.</b> Faixas de aplicação dos compressores .....	69
<b>Tabela 5.</b> Valores de potência consumida para compressão do ar. ....	72
<b>Tabela 6.</b> Valores de potência consumida para compressão do ar. ....	72
<b>Tabela 7.</b> Valores de potência consumida para compressão do ar. ....	72
<b>Tabela 8.</b> Quantidade de água e Ponto de Orvalho em Aplicações Industriais	80
<b>Tabela 9.</b> Componentes do circuito pneumático .....	85
<b>Tabela 10.</b> Relação de custo (R\$) em função dos diâmetros dos orifícios existentes na tubulação à uma pressão de trabalho de 6,0 bar e uma tarifa de 0,40 R\$/kWh.....	86
<b>Tabela 11.</b> Valores médios para potência de compressão, vazão de escape e consumo específico de energia.....	89
<b>Tabela 12.</b> Despesa em função dos vazamentos na rede de ar comprimido ..	90
<b>Tabela 13.</b> Comparativo entre os gastos anuais e economia de energia elétrica ao longo de 10 anos para uma tarifa de 0,40 R\$/kWh, reajuste salarial de 5% e reajuste da tarifa médio de 6,21%.....	93

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Relação entre Vazão e Energia Específica em cada processo de compressão.....	42
<b>Gráfico 2.</b> Comparação dos Métodos de Secagem de Ar Comprimido .....	81

## SUMÁRIO

<b>1.0 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>-</b>
<b>1.1 CONTEXTO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 OBJETIVO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AR .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Compressibilidade .....	18
2.1.2 Elasticidade .....	19
2.1.3 Difusibilidade .....	19
2.1.4 Expansibilidade.....	20
2.1.5 Peso do Ar .....	20
2.1.6 Atmosfera .....	22
2.1.7 Pressão atmosférica .....	23
2.1.9 Lei geral dos gases perfeitos .....	25
2.1.10 Princípio de Pascal .....	26
<b>2.2 UMIDADE DO AR .....</b>	<b>27</b>
2.2.2 Umidade Relativa do Ar .....	28
<b>2.3.1 Definição.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2 Funcionamento de um Compressor de Ar .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3 Classificação Segundo os Princípios de Trabalho.....</b>	<b>31</b>
2.3.3.1 Deslocamento Positivo .....	31
2.3.3.2 Deslocamento Dinâmico.....	32
<b>2.3.4 Tipos de Compressores.....</b>	<b>33</b>
2.3.4.1 Compressores de Deslocamento Dinâmico.....	33
2.3.4.1.1 Compressor Dinâmico de Fluxo Radial .....	33
2.3.4.1.2 Compressor Dinâmico de Fluxo Axial .....	34
2.3.4.2 Compressores de Deslocamento Positivo .....	35

2.3.4.2.1 Compressor Rotativos .....	35
2.3.4.2.1.1 Compressor de Palhetas.....	35
2.3.4.2.1.2 Compressor Espiral.....	36
2.3.4.2.1.3 Compressor de Lóbulos .....	37
2.3.4.2.1.4 Compressor tipo Roots .....	37
2.3.4.2.1.5 Compressor de Parafuso .....	38
2.3.4.2.2 Compressores de Pistão .....	40
2.3.4.2.2.1 Compressor de Simples Efeito (S.E.) ou Compressor Tipo Tronco.....	40
2.3.4.2.2.2 Compressor de Duplo Efeito (D.E.) – Compressor Tipo Cruzeta .....	41
2.3.4.3 Relação entre Vazão e Energia específica em cada processo de compressão.....	42
2.3.5 COMPLEMENTAÇÃO DOS COMPRESSORES .....	43
2.3.5.1 Cilindros (Cabeçotes) .....	43
2.3.5.2 Êmbolo (Pistão) .....	43
2.3.6 SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS COMPRESSORES.....	44
2.3.6.1 Refrigeração a Água.....	45
2.3.6.2 Resfriamento a Ar.....	47
2.4 TERMODINÂMICA APLICADA A VOLUMES DE CONTROLE .....	48
2.4.1 Conservação da massa para um volume de controle .....	49
2.4.2.1 Rendimento Mecânico “ $\eta_c$ ” .....	51
2.4.2.2 Rendimento Termodinâmico “ $\eta_{th}$ ” .....	52
2.4.2.2.1 Trabalho ideal de um compressor “ $W_{th}$ ” (processo isentrópico) .....	53
2.4.2.2.2 Trabalho real de um compressor “ $W$ ” (processo politrópico).54	
2.4.3 Potência de compressão .....	55
2.5 Tipos de Volume .....	56

2.5.1 Volume de Ar Livre V (m <sup>3</sup> ) .....	56
2.5.2 Volume Normal N (m <sup>3</sup> ) .....	56
2.5.3 Volume Efetivo V <sub>e</sub> (m <sup>3</sup> ).....	56
2.6 INTRODUÇÃO AOS SÍMBOLOS GRÁFICOS DA ANS PARA COMPONENTES PNEUMÁTICOS.....	56
2.7 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA “C” (kWh/m <sup>3</sup> ).....	57
<b>3.0 METODOLOGIA .....</b>	<b>58</b>
3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E NORMAS APLICÁVEIS .....	59
3.2 DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE TRABALHO .....	61
3.3 MODELAGEM FÍSICA DO SISTEMA .....	62
3.4 MODELAGEM FÍSICA DO SISTEMA PROPOSTO .....	62
3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA .....	62
3.6 ESPECIFICAÇÃO DAS MODIFICAÇÕES PROPOSTAS E RESULTADOS ESPERADOS.....	63
3.7 ORÇAMENTO E ESTUDO ECONÔMICO .....	63
<b>4.0 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>64</b>
4.1 IDENTIFICANDO AS PRINCIPAIS PERDAS DE EFICIÊNCIA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO .....	64
4.1.1 REDUÇÃO DE PERDAS EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE TRABALHO .....	65
4.1.2 REDUÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DA TEMPERATURA DO AR ASPIRADO PELO COMPRESSOR.....	66
4.1.4 REDUÇÃO DE PERDAS PELA ESCOLHA DO TIPO DE COMPRESSOR.....	69
4.1.5 REDUÇÃO DE PERDAS POR VAZAMENTO .....	71
4.1.6 REDUÇÃO DE PERDA VIA DRENAGEM DE CONDENSADO.....	73
4.1.6.1 SELEÇÃO DOS TIPOS DE DRENAGEM PARA CONDENSADO .....	73

4.1.7 REDUÇÃO DE PERDAS PELO TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO .....	74
4.1.7.1 BENEFÍCIOS OBTIDOS COM O TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO.....	75
4.1.7.2 TIPOS DE TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO .....	76
4.1.7.2.1 Secagem do ar comprimido.....	76
4.1.7.2.1.1 Secagem via Aftercooler .....	76
4.1.7.2.1.2 Secagem por Refrigeração .....	77
4.1.7.2.1.3 Secagem por Adsorção.....	77
4.1.7.2.1.4 Secagem por Absorção.....	79
4.1.7.2.2 Filtragem do ar comprimido.....	81
4.1.8 Redução de perda pela recuperação do calor de compressão.....	82
<b>4.2 SELEÇÃO DA MELHORIA NO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO.....</b>	<b>83</b>
<b>4.3 MODELAGEM DO SISTEMA ATUAL .....</b>	<b>84</b>
<b>4.4 DEFINIÇÃO DE METAS AO SISTEMA PROPOSTO .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5 ANÁLISE MATEMÁTICA DO SISTEMA .....</b>	<b>86</b>
<b>4.6 AÇÕES A SEREM IMPLANTADAS .....</b>	<b>90</b>
<b>4.7 VERIFICAÇÃO DE EFICÁCIA.....</b>	<b>91</b>
<b>5.0 CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>
<b>6.0 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>95</b>

## **1.0 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONTEXTO**

Durante as últimas décadas pôde-se notar um imensurável avanço tecnocientífico presentes nos setores industriais, proporcionando diversos progressos que acarretaram a mitigação da dificuldade de exercer certas atividades, seja no setor industrial ou nas próprias rotineiras que nos deparamos em nosso dia a dia.

Tais incumbências, que antigamente diziam-se impossíveis ou eram até mesmo inimagináveis, com o decorrer do tempo; em função do avanço tecnológico, passaram a se tornar cada vez mais necessárias e inabdicáveis, em virtude da facilidade de execução das mesmas e da relação benéfica de custo-benefício.

Conforme o passar dos anos, os métodos e técnicas de realização de determinada tarefa foram sendo desenvolvidos e superados à medida que o conhecimento humano se ampliava, e de forma progressiva, tal desenvolvimento vem acarretando na evolução do meio técnico-científico, servindo como pilares para enriquecimento do conhecimento pleno e conseqüentemente como marco para as revoluções industriais.

Levando em consideração o meio moderno-tecnológico, a principal aplicabilidade da ascensão de tal conhecimento, tendo em vista a viabilidade econômica para uma empresa, é a junção entre a ciência pura e as técnicas desenvolvidas para facilitar as atividades requeridas em um mercado de ampla concorrência.

Tendo em vista a otimização industrial, existem diversos equipamentos e processos que utilizam um fluido para elaborar determinada força, com o intuito de deslocar e coibir um objeto, ou para possuir controle em uma ação. Uma das utilizações práticas de um fluido e sua aplicabilidade em nosso cotidiano é a possibilidade e facilidade de movimentos rápidos e eficazes, como a abertura das portas de um ônibus.

Neste contexto, os processos e atividades automatizadas tornam-se elementares para alcançar um elevado rendimento, pois elas possibilitam uma maior precisão do que a ordinária mão de obra humana, que é muito mais suscetível à erros e inconstâncias, em função de sua própria natureza. Dito isto, ao se tratar de uma fábrica visando sua permanência no mercado, a mesma sempre buscará por formas de automatizar seus mais diversos processos.

Em muitos polos industriais, os compressores são responsáveis por um maior consumo de energia elétrica do que qualquer outro tipo de máquina, e os desaproveitamentos e ineficiências no sistema de ar comprimido acabam resultando em um gasto excessivo e desnecessário. Praticamente todas as indústrias operam com ar comprimido em sua fabricação, tendo um histórico notável de ineficiência em suas respectivas instalações.

Para que o ar atmosférico seja captado e armazenado à alta pressão em um tanque de armazenamento pelo compressor, o mesmo terá que realizar um trabalho, convertendo a energia de um motor elétrico, ou de combustão interna em energia pneumática. As economias podem ser diversas, por exemplo, via melhorias no sistema de ar comprimido e distribuição do mesmo ao longo de toda a planta, podendo acarretar uma redução de 20 a 40% de seu consumo de eletricidade.

## **1.2 OBJETIVO**

Neste trabalho será abordado a eficiência energética da rede de distribuição de ar comprimido em uma usina, em função da demanda requerida pelo seus mais diversos equipamentos e processos, tendo como fator preponderante a correta distribuição do fluido em relação à pressão e vazão volumétrica, tal como seu custo realmente controlado.

Além destes aspectos, serão tratados os eventuais problemas das perdas geradoras de ineficiência do sistema, entre o início da trajetória do fluido pressurizado até suas respectivas aplicações destinadas, e as cabíveis melhorias a serem tomadas para aumentar o rendimento do referido sistema.

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AR

O estudo e conhecimento das propriedades físicas do ar será de extrema importância para este trabalho, visto que elas são diretamente responsáveis pelo comportamento do fluido em questão. Apesar do mesmo ser insípido, inodoro e incolor, podemos notar o ar seja por ventos, ondas sonoras que nele se propagam, pássaros e aviões que nele voam e se movimentam, ou sensações térmicas devido ao impacto do mesmo sobre o corpo humano. Tendo em vista a importância do mesmo em nosso contexto, algumas propriedades serão apresentadas com o intuito de facilitar o entendimento de seu comportamento.

#### 2.1.1 Compressibilidade

O ar como todos os outros gases possui a capacidade de ocupar todo o volume de um determinado recipiente, de modo a adquirir seu formato, uma vez que o fluido não possui um formato próprio.

Deste modo, pode-se manter o mesmo em um recipiente com um volume predeterminado, e em seguida forçar uma redução em seu volume com o conhecimento de uma entre as diversas propriedades do mesmo, a compressibilidade.

Pode-se dizer então, que o fluido em questão permite com que seu volume seja reduzido desde que haja uma força exterior que proporcione tal fenômeno, conforme figura 1.

**Figura 1.** Esquematização da Compressibilidade do Ar

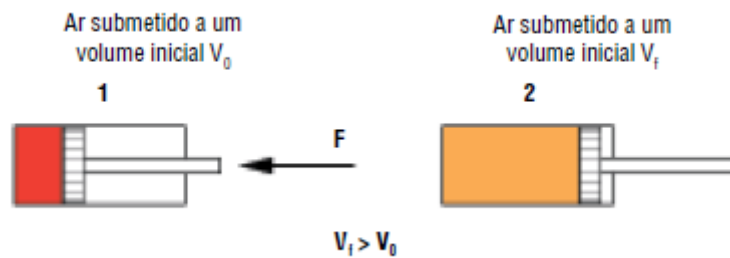


Fonte: Parker Training

### 2.1.2 Elasticidade

Ao contrário da compressibilidade descrita anteriormente, a elasticidade consiste na propriedade do ar em retornar-se ao seu volume inicial quando cessada a força de excitação responsável pela sua compressão inicial, sendo este sistema exemplificado pela figura 2.

**Figura 2.** Esquematização da Elasticidade do Ar



Fonte: Parker Training

### 2.1.3 Difusibilidade

A propriedade do ar responsável por permitir que o mesmo se misture de maneira homogênea seja com qual for o meio gasoso que por sua vez não esteja saturado, chama-se difusibilidade. Este fenômeno está representado pela figura 3.

**Figura 3.** Esquematização da Difusibilidade do Ar



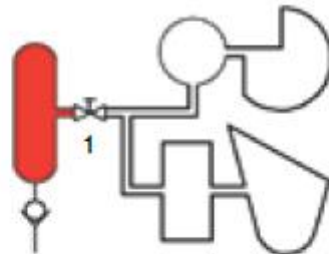
Fonte: Parker Training

#### 2.1.4 Expansibilidade

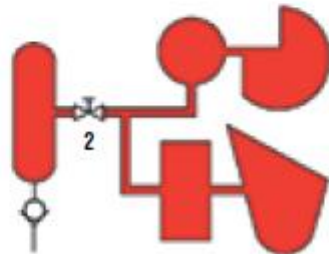
Esta propriedade é responsável pela característica do ar de ocupar por inteiro o volume de qualquer seja o recipiente, de modo a adquirir o formato do mesmo, conforme ilustrado pela figura 4.

**Figura 4.** Esquemática da Expansibilidade do Ar

Possuímos um recipiente contendo ar; a válvula na situação 1 está fechada.



Quando a válvula é aberta o ar expande, assumindo o formato dos recipientes, porque não possui forma própria.



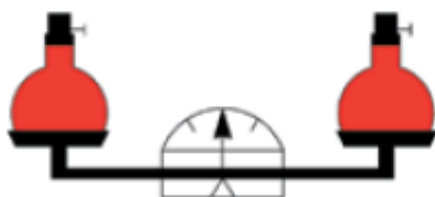
Fonte: Parker Training

#### 2.1.5 Peso do Ar

De forma igualitária à toda matéria existente, o ar tem peso. É possível verificar a existência deste através da experiência mostrada na figura 5, constituída de dois balões iguais, hermeticamente fechados e de forma a conter o mesmo ar; ou seja, mesma pressão e temperatura.

Ao colocarmos os dois balões em uma balança, pode-se notar o equilíbrio entre eles, ou seja, possuem o mesmo peso.

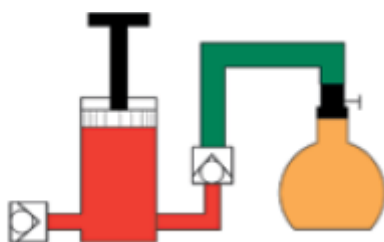
**Figura 5.** Balões com o mesmo peso em equilíbrio em uma balança de precisão.



Fonte: Parker Training

O próximo passo, para constatar a existência de tal propriedade, é retirar o peso de um dos balões, com o intuito de fornecer um desequilíbrio, caso tal conceito seja verdadeiro. Deste modo, utiliza-se uma bomba de vácuo para realização da tarefa, podendo ser verificada na figura 6.

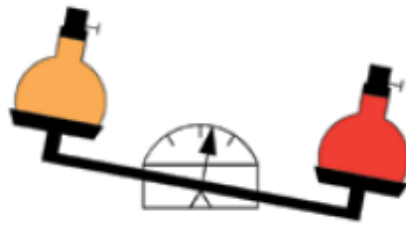
**Figura 6.** Ar de um dos balões sendo removido por bomba de vácuo.



Fonte: Parker Training

Feito isto, colocam-se os balões novamente na mesma balança de precisão. Se os balões permanecerem em equilíbrio constata-se a inexistência de tal propriedade, porém, se um desequilíbrio for ocasionado, conforme demonstrado pela figura 7, esta propriedade é verídica.

**Figura 7.** Balões em desequilíbrio em função do peso existente no ar.



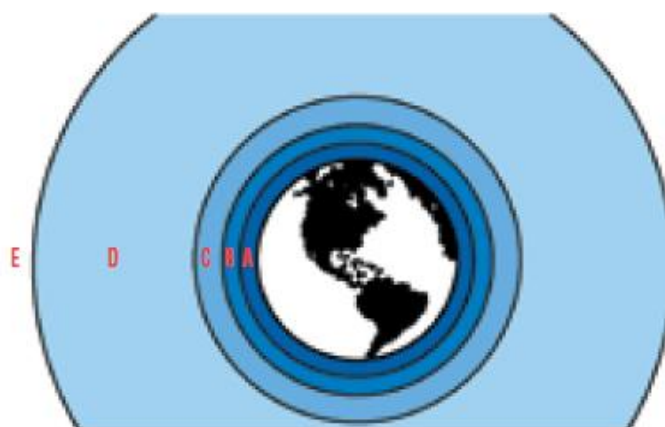
Fonte: Parker Training

### 2.1.6 Atmosfera

Trata-se de uma camada formada por diversos gases, sendo em sua maioria oxigênio (O<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), sendo suas proporções de 21 e 78%, respectivamente, o restante então é constituído de outros gases. A superfície terrestre é toda envolvida pela atmosfera, sendo a mesma então responsável pela existência da própria vida.

Na figura 8 podemos identificar as diversas subcamadas existentes na atmosfera, com seus respectivos raios.

**Figura 8.** Subcamadas da atmosfera e seus respectivos raios



- A - Troposfera - 12 km
- B - Estratosfera - 50 km
- C - Mesosfera - 80 km
- D - Termosfera/Ionosfera - 500 km
- E - Exosfera - 800 a 3000 km

Fonte: Parker Training

É importante ressaltar que em função da constatação do ar possuir um determinado peso, as camadas inferiores são sucessivamente comprimidas pelas camadas superiores. Deste modo podemos constatar que as inferiores serão mais densas do que as superiores, concluindo-se que para um mesmo volume de ar, o ar comprimido será mais denso do que o mesmo fluido à pressão atmosférica, pressão esta que será vista em seguida.

### 2.1.7 Pressão atmosférica

Conforme mencionado anteriormente, o ar possui um determinado peso. Portanto, é notável que todos vivemos sob uma determinada pressão, em função do peso que o ar exerce sobre nós.

O fato de que não sentimos tal pressão é devido à atmosfera exercer simultaneamente a mesma força em todos os sentidos e direções, possuindo a mesma intensidade.

A intensidade da pressão descrita, ao nível do mar, a uma temperatura de aproximadamente 20°C e uma umidade relativa de 36% é cerca de 01 atmosfera ou 1 atm ou 760mmHg (milímetros de mercúrio) ou 1 bar, que equivale respectivamente à uma pressão de 14,5 lbf/pol<sup>2</sup>. Conforme diversas atividades em nosso cotidiano, notamos a variação da pressão conforme a altitude em que nos encontramos, pois a pressão atmosférica varia de modo proporcional à tal. Na tabela 1 pode-se identificar esta variação em função da altitude.

**Tabela 1.** Variação da pressão atmosférica em relação à altitude

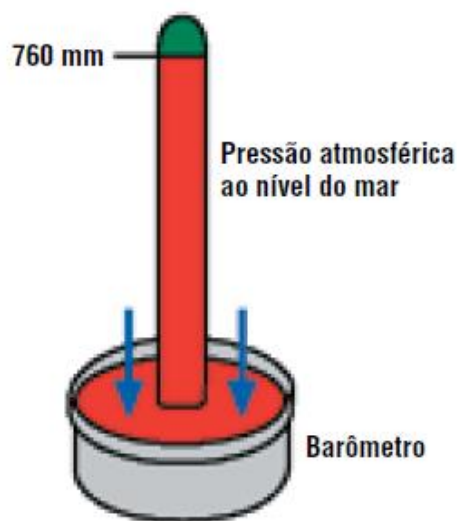
Altitude m	Pressão Kgf/cm <sup>2</sup>	Altitude m	Pressão Kgf/cm <sup>2</sup>
0	1,033	1000	0,915
100	1,021	2000	0,810
200	1,008	3000	0,715
300	0,996	4000	0,629
400	0,985	5000	0,552
500	0,973	6000	0,481
600	0,960	7000	0,419
700	0,948	8000	0,363
800	0,936	9000	0,313
900	0,925	10000	0,270

Fonte: Parker Training

Costuma-se ter o pensamento de que o ar não possui peso próprio, todavia, foi possível recapitular que todos os gases que circundam o planeta e formam o denominado “ar” exercem pressão sobre a terra. O denominado barômetro de Torricelli, ilustrado pela figura 9, em homenagem ao físico Torricelli, é um instrumento utilizado para medição da pressão atmosférica, sendo seu método através de uma coluna de mercúrio que se desloca conforme submetida à tal pressão.

A metodologia consistiu em encher um tubo de mercúrio e invertê-lo em uma determinada cuba que esteja cheia de mercúrio. Torricelli então pôde observar que a atmosfera denominada “padrão” suporta, aproximadamente, uma coluna de mercúrio de 760mm de altura, por isso o termo 760mmHg para uma pressão de 1 atm.

**Figura 9.** Barômetro de Torricelli



Fonte: Parker Training

Qualquer elevação acima do nível do mar, onde a pressão é considerada padrão, ou 1 atm, deve medir necessariamente menos do que o valor anterior de 760mmHg.

Em um conjunto hidráulico de trabalho, as unidades das pressões superiores à atmosférica são comumente kgfcm<sup>2</sup>, enquanto as inferiores são medidas em mmHg (milímetros de mercúrio).

### 2.1.8 Gases perfeitos ou ideais

Os denominados gases perfeitos são gases idealizados, que apresentam características particulares e obedecem à lei geral dos gases e à lei de Clapeyron.

Algumas características dos gases perfeitos são importantes para seu discernimento, sendo elas:

- Nos gases ideais não existe interação gravitacional entre suas moléculas;
- As colisões ocasionadas entre suas mais diversas moléculas são deduzidas a serem de modo perfeitamente elástica, ou seja, a energia cinética é totalmente conservada;
- É notado um movimento desordenado e velocidades que são dependentes da própria temperatura do gás em questão;
- Ao avaliar-se o volume de uma única molécula, constata-se que o mesmo é insignificante quando colocado em comparação ao volume total do gás.

### 2.1.9 Lei geral dos gases perfeitos

A lei dos gases ideais ou perfeitos, é um conjunto de leis que possuem o intuito de descrever, de certo modo, o comportamento dos gases quando submetidos à diversas circunstâncias. Tais leis são: Lei de Boyle-Mariotte, Charles e Gay Lussac.

A primeira constata que há uma relação inversamente proporcional entre a pressão e o respectivo volume do gás, ou seja, quanto maior for a pressão exercida sobre o gás, menor será o volume ocupado por ele.

A lei de Charles, por sua vez, determina a relação proporcional entre uma determinada pressão do gás e sua respectiva temperatura. A explicação é embasada no fundamento de que quanto maior é a temperatura interna do gás, as moléculas estarão cada vez mais agitadas, colidindo umas com as outras e contra as paredes do recipiente, elevando sua pressão.

Por fim, a lei de Gay Lussac estabelece a relação diretamente proporcional entre o volume de um gás e sua temperatura.

Para que haja um melhor entendimento e compreensão de todas as leis citadas anteriormente, existe a equação de Clapeyron, que tem como funcionalidade sintetizar todas estas leis, com o objetivo de uma abordagem prática e determinar uma relação única entre as diversas variáveis de estado que foram vistas acima, conforme equação 1.

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \quad (1)$$

Em função de tais relações são conhecidas então as três variáveis do gás em questão. Logo, se qualquer uma delas sofrer alguma alteração, poderá se prever o efeito nas outras duas.

#### 2.1.10 Princípio de Pascal

Conforme dito anteriormente, o ar é muito suscetível à compressão quando submetido à força, mesmo de intensidade pequena, logo, quando o mesmo é contido em um receptáculo fechado, a pressão que o ar exerce sobre todas as paredes é igual, em todos os sentidos.

Blaise Pascal define o assunto: "A pressão exercida em um líquido confinado em forma estática atua em todos os sentidos e direções, com a mesma intensidade, exercendo forças iguais em áreas iguais". A equação 2 exemplifica o sistema.

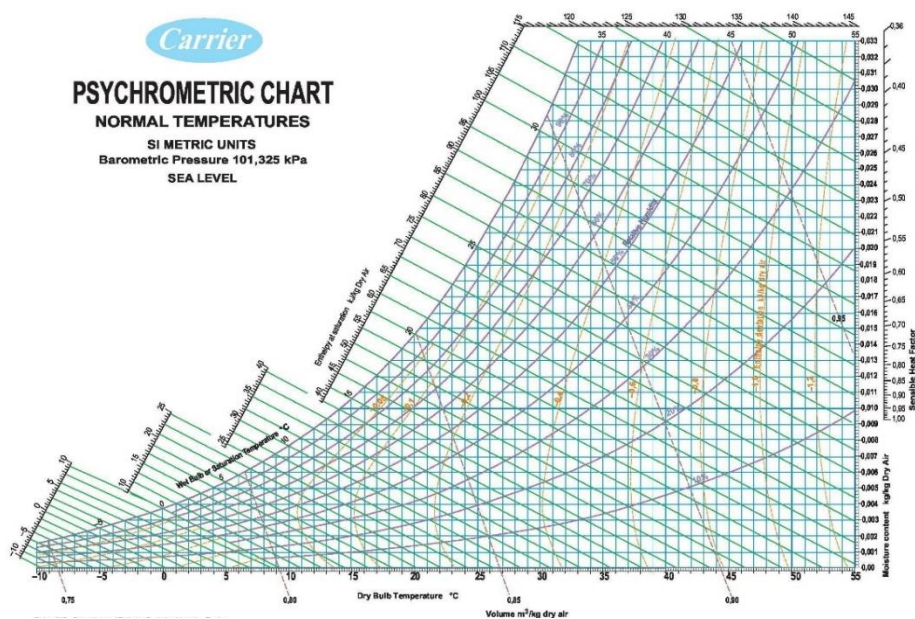
$$F_1/A_1 = F_2/A_2 \quad (2)$$

## 2.2 UMIDADE DO AR

Nota-se de forma evidente a presença de umidade na atmosfera. Quando o ar está muito seco, ou seja, quando há uma baixa umidade relativa do ar, propaga-se uma série de desconfortos ao ser humano, como ressecamentos de vias nasais (podendo muitas vezes gerar até mesmo um certo sangramento), e perdas excessivas de líquidos via transpiração.

Por outro lado, quando a umidade relativa encontra-se muito elevada, mesmo não causando danos à saúde do homem, gera-se também uma série de desconfortos, como a sensação de calor, tal como a de ar “abafado”. Visto que nosso corpo tende à refrigerar-se via transpiração, evaporando o suor do corpo para o ar circundante, quando a umidade do ar está alta, tal fenômeno não se torna possível, uma vez que o ar ambiente estará saturado, não podendo absorver as partículas líquidas que deveriam estar sendo evaporadas para o meio, deixando a superfície do corpo humano “molhada”, e, conseqüentemente, não se refrigerando como em uma situação com baixa umidade relativa. Alguns fatores determinam a umidade relativa do ar e absoluta do mesmo, tais como variações de temperatura e entalpia do ar atmosférico, ou, por um outro ponto de vista, são determinadoras de tais, conforme exemplificado na figura 10.

**Figura 10.** Carta psicrométrica



Fonte: Carrier

### 2.2.1 Umidade Absoluta do Ar

A umidade absoluta, ou umidade atmosférica, como abordada por diversos autores, é de tamanha importância para entendimento de alguns aspectos climáticos. Ela é determinada por alguns fatores climáticos e reguladora de outros, tendo como exemplo as variações de temperatura. Pode-se dizer que, a umidade absoluta do ar, é a quantidade de vapor d'água presente no ar atmosférico, ou seja, o quão úmido está o ar, medida em  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Arseco}}$ , de acordo com a figura 10.

### 2.2.2 Umidade Relativa do Ar

Por sua vez, a umidade relativa é a relação entre a quantidade total de vapor de água existente no ar e a quantidade máxima que o mesmo poderia absorver nas mesmas condições, ou seja, até seu ponto de saturação.

De acordo com o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, da Universidade de Campinas (Unicamp), são apresentados alguns níveis de atenção com relação às diferentes umidades relativas do ar, conforme apresentado na tabela 2.

**Tabela 2.** Recomendações em função do percentual de umidade (%)

Percentual	Classificação	Recomendação
Entre 20 a 30%	Estado de Atenção	Recomenda-se evitar exercícios e caminhadas nas horas mais quentes do dia e com maior insolação, geralmente entre as 11h e 15h no horário convencional.
Entre 12 e 20%	Estado de Alerta	Quando a umidade relativa alcança esses níveis, o tempo de proibição dos exercícios ao ar livre aumenta, indo das 10h às 16h. Também é preciso buscar sempre a hidratação e procurar umidificar o ar.
Abaixo de 12%	Estado de Emergência	Além de todas as medidas anteriores, é necessário evitar exercícios físicos durante o dia e procurar sempre se manter hidratado com água, umidificadores e panos úmidos sobre o rosto e as narinas, evitando a irritação das vias nasais.

Fonte: Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura; Unicamp

## 2.3 COMPRESSORES DE AR

### 2.3.1 Definição

Um compressor de ar é denominado como um equipamento básico para qualquer seja o sistema pneumático. Neste dispositivo, o ar é comprimido em decorrência do sistema previamente descrito, de tal forma que o mesmo possa ser utilizado para diversas funções, seja ela puxar, empurrar, efetuar um determinado trabalho ou desenvolver potência. O ar atmosférico; à pressão atmosférica, adentra o compressor, e o mesmo é comprimido pelo equipamento a uma elevada pressão, e então, descarregado em um sistema de ductos para suas variadas aplicações. Este conceito pode ser útil tanto para atividades complexas, como em um sistema de limpeza de mangas de um desempoeirador industrial, como em aplicações mais simplórias, como o enchimento de um pneu em uma borracharia, entre outros dispositivos. As figuras 11 e 12 ilustram diferentes tipos de compressores.

**Figura 12.** Compressor de ar Worthington para aplicações industriais



Fonte: Worthington

**Figura 11.** Compressor de ar para aplicações simples



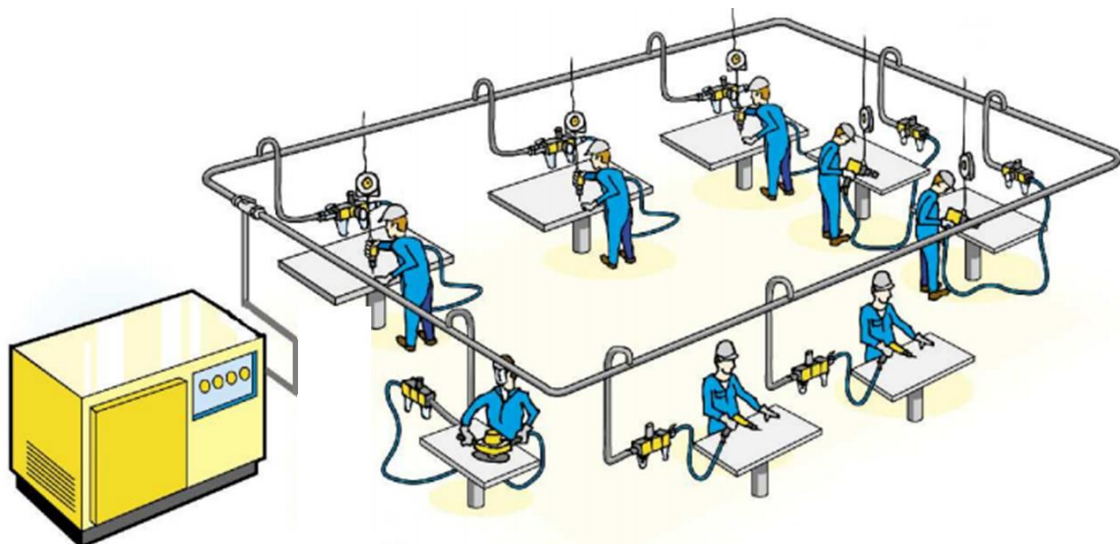
Fonte: Pressure

### 2.3.2 Funcionamento de um Compressor de Ar

Existem diversos tipos de compressores e suas cabíveis aplicações, porém, seu método de trabalho consiste sempre em etapas sequenciais.

O ar atmosférico flui para a entrada do compressor, o equipamento então eleva a pressão deste ar, podendo chegar na saída do mesmo, a uma pressão dezena de vezes superior à atmosférica. Uma válvula de alívio na descarga do referido maquinário é utilizada com o intuito de evitar pressões denominadas excessivamente altas, podendo acarretar em desgaste e danos ao conjunto. Em meio ao sistema, existe um filtro cuja função é remover a sujidade no ar e reter particulados. Um lubrificante adequado acrescenta no circuito uma certa quantia de óleo ao fluido que percorre os ductos, ao mesmo tempo em que lubrifica toda e qualquer superfície deslizante para redução do atrito, como por exemplo, as superfícies do pistão e do cilindro. O ar pressurizado então, promove uma força no pistão e em sua haste, de modo a ocasionar uma movimentação do mesmo e conseqüentemente movimentar um dispositivo qualquer ou carga. É possível verificar a esquematização básica de um sistema de ar comprimido, exemplificado pela figura 13.

**Figura 13.** Sistema de Ar Comprimido

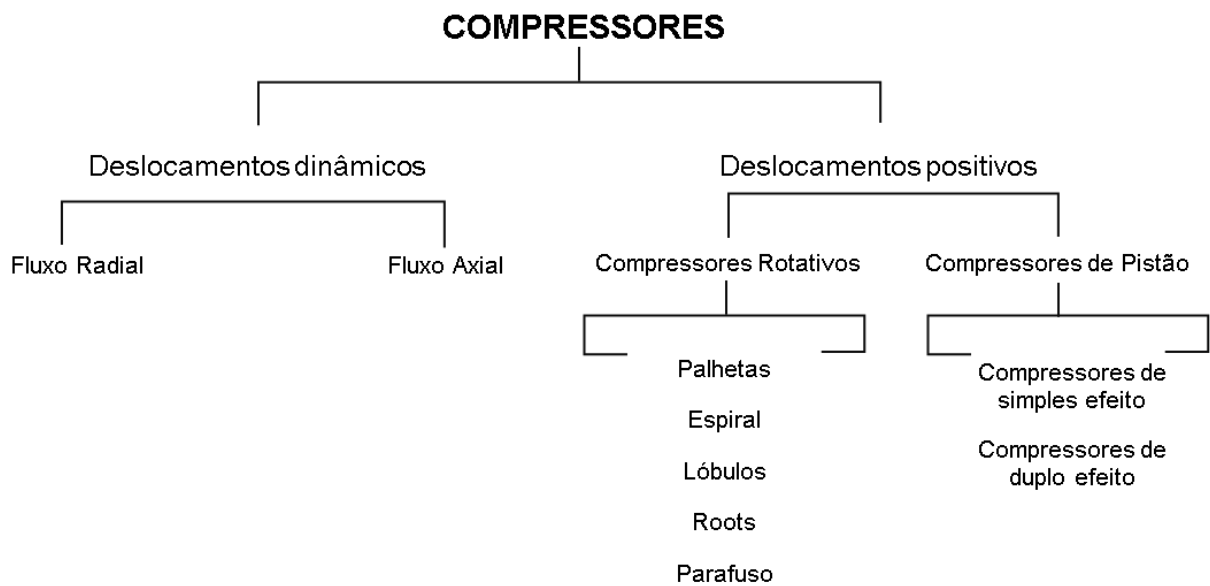


Fonte: Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2002

### 2.3.3 Classificação Segundo os Princípios de Trabalho

Existem diversos tipos de compressores para suas distintas aplicabilidades. A figura 14 demonstra a classificação dos equipamentos pelos princípios de trabalho.

**Figura 14.** Esquemática dos diversos tipos de compressores de acordo com seus princípios de trabalho



Fonte: Autoria própria

#### 2.3.3.1 Deslocamento Positivo

É fundamentado na redução do volume. Proveniente do meio exterior, é possível admitir o ar em uma câmara isolada onde irá diminuir de volume gradativamente, elaborando-se a compressão.

Atingindo-se a pressão predeterminada, suas válvulas de descarga se abrem ou o ar é escoado para o tubo de descarga com o decaimento do volume da câmara de compressão.

### 2.3.3.2 Deslocamento Dinâmico

Convertendo-se a energia cinética em energia potencial, obtém-se a elevação de pressão, via passagem de ar pelo compressor.

Através de impulsores (rotores laminados) operando a alta velocidade em contato com o fluido admitido, o ar torna-se acelerado, podendo chegar a velocidades elevadas, ocasionando na transmissão de energia cinética ao mesmo. Após o descrito, o escoamento é atrasado em função de difusores, tendo como obrigatoriedade, como notado no teorema de Bernoulli (equação 3), o aumento de sua pressão.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \text{cte} \quad (3)$$

Onde:

$p$  = Pressão manométrica de um determinado ponto [N/m<sup>2</sup>];

$\gamma$  = Peso específico do fluido [N/m<sup>3</sup>];

$z$  = desnível do ponto em relação a um referencial; [m]

$v$  = velocidade do fluido ao longo do conduto [m/s]

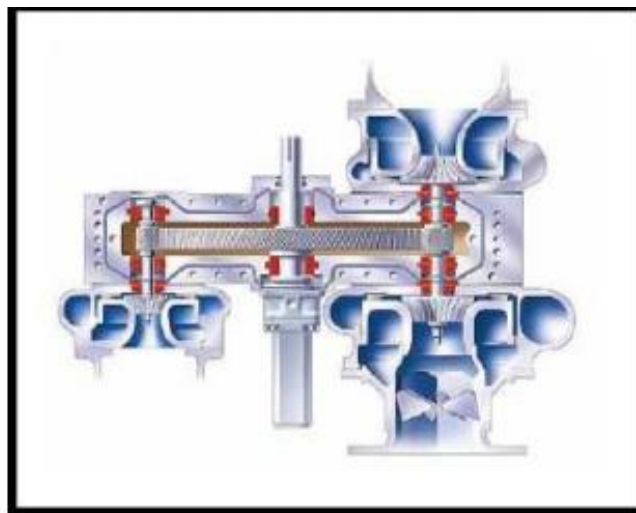
## 2.3.4 Tipos de Compressores

### 2.3.4.1 Compressores de Deslocamento Dinâmico

#### 2.3.4.1.1 Compressor Dinâmico de Fluxo Radial

Em direção à periferia, a partir do centro de rotação, aumenta-se a velocidade do ar, que é admitido pela primeira hélice (rotor adotado de lâminas dispostas radialmente) axialmente, e de forma radial é impulsionado e exaurido. A figura 15 demonstra um compressor centrífugo radial.

**Figura 15.** Compressor Centrífugo Radial



Fonte: Atlas Copco, 2006.

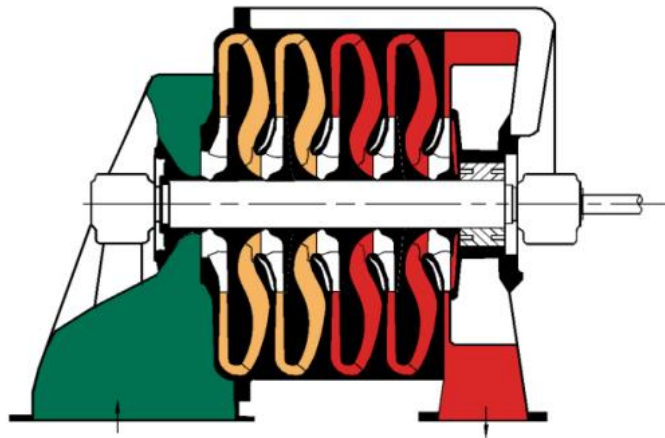
Para se obter a conversão da energia cinética em pressão, é necessário que o ar, antes de ser guiado ao centro de rotação do estágio posterior, se desloque através de um difusor, tendo em vista que diversos estágios estarão reunidos em uma carcaça.

Antigamente o resfriamento dentre estágios ocorria no compressor através de camisas d'água. Atualmente, há resfriadores de grande porte interpostos de forma heterogênea, devido grande sensibilidade à pressão. Antes

que seja relocado para o grupo seguinte o ar deve-se passar por três estágios. O referido resfriamento, não é possível em compressores de baixa pressão.

A eficiência está ligada diretamente a pressão de trabalho. Tendo a base de um compressor de deslocamento positivo, sua eficiência seria menor. Sendo utilizados principalmente quando há a necessidade de grandes volumes de ar comprimido. A figura 16 ilustra um compressor dinâmico de fluxo radial.

**Figura 16.** Compressor Dinâmico de Fluxo Radial



Fonte: Parker Training

#### 2.3.4.1.2 Compressor Dinâmico de Fluxo Axial

Para que seja chamado compressor axial, este então deve realizar a compressão paralela ao veio do motor.

Destinada a produção de ar comprimido o caudal sendo a vazão volumétrica mínima em jogo é de tal forma elevada a 900 m<sup>3</sup>/min para um sistema de dimensão industrial. A figura 17 caracteriza tal compressor.

**Figura 17. Compressor Axial**



Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

## 2.3.4.2 Compressores de Deslocamento Positivo

### 2.3.4.2.1 Compressor Rotativos

#### 2.3.4.2.1.1 Compressor de Palhetas

Quando o assunto é compressor de palhetas, temos a redução do volume à medida que o ar admitido é transportado por bolsas formadas entre palhetas, esses espaços são reduzidos de forma gradual com o giro do motor. A pressão máxima que um compressor desse tipo pode atingir é de 10 bar. Esses por sua vez podem ser arrefecidos por ar e por água não possuindo válvulas. Com fornecimento uniforme de ar com qualquer pulso. A fim de evitar o atrito entre o estator e as palhetas, é realizado uma lubrificação do sistema, fazendo com que a película de óleo existente as peças moveis e o corpo fixo não deixe que haja contato metálico. A figura 18 demonstra a esquematização deste compressor.

**Figura 18.** Compressor de Palhetas

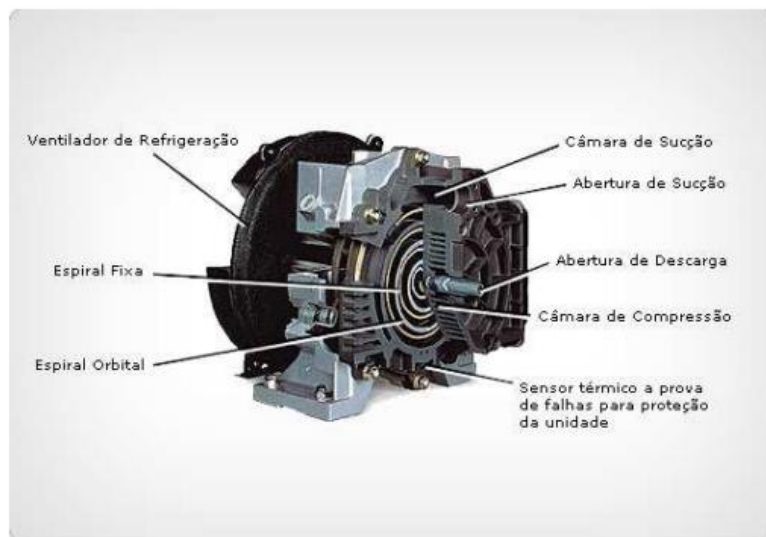


Fonte: site: <http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

#### 2.3.4.2.1.2 Compressor Espiral

Um compressor de forma simplista se compreende em uma espiral fixa e outra caminhante e a compressão do ar se processa da interação dessas espiras. Essa compressão se repete fazendo com que haja um caudal de ar isento de pulsações. Suas aplicações são de alta exigência sendo uma produção de ar comprimido isento de óleo. A figura 19 expressa suas particularidades.

**Figura 19.** Compressor Espiral

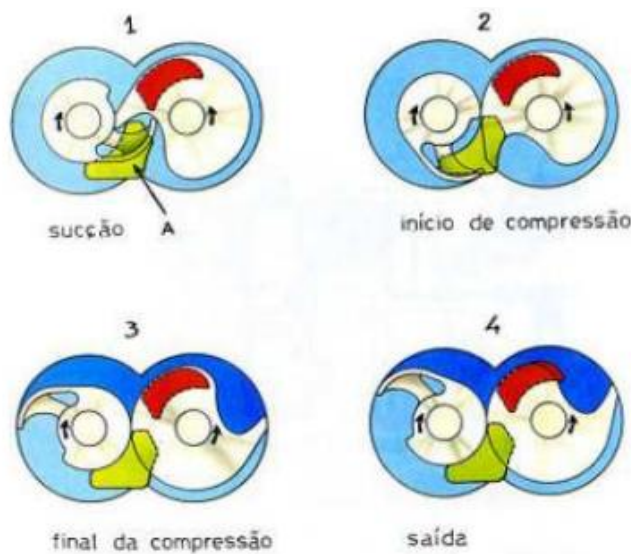


Fonte: BlogAr.

### 2.3.4.2.1.3 Compressor de Lóbulos

Lembra um compressor como os de parafuso, possuindo um rotor macho e outro fêmea, rodando em sentidos opostos sem contato metálico, com engrenagens que os afastam, sincronizados e com tolerâncias rigorosas. Os elementos básicos de compressão têm formato de dentes diferentes dos helicoidais, conforme ilustrado pela figura 20.

**Figura 20.** Compressor de Lóbulos



Fonte: site:

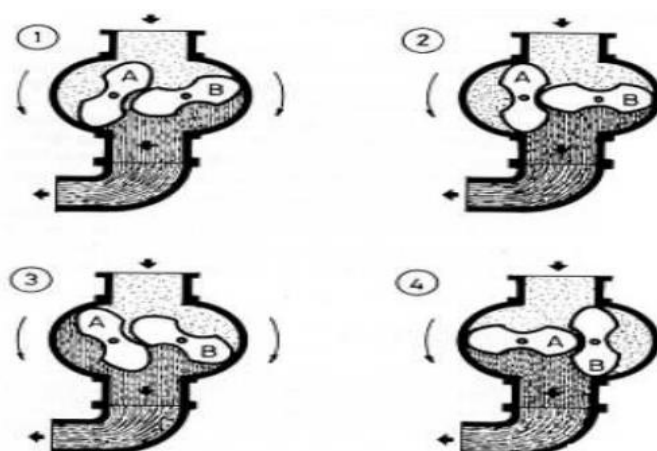
<http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

### 2.3.4.2.1.4 Compressor tipo Roots

Com dois rotores simétricos impulsores em forma de oito, tem um corpo de seção elíptica ou oval, com giro em sentidos opostos e cujos lóbulos engrenam, fazendo com que a parte convexa esteja de forma interna da côncava do outro, sincronizado por engrenagens exteriores.

O ar que passa pelo sistema não necessita ser lubrificado, gerando um ar comprimido isento de óleo. A figura 21 ilustra tal compressor.

**Figura 21.** Compressor tipo Roots



Fonte: site:

<http://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/aula-2-e-3-compressores.pdf>.

#### 2.3.4.2.1.5 Compressor de Parafuso

Partindo do princípio de uma carcaça, girando em sentidos opostos, temos dois rotores helicoidais gerando trabalho. Cada um com sua forma específica, um contendo lóbulos convexos, e o outro depressão côncava sendo denominados respectivamente, macho e fêmea.

Temos duas opções de movimentação dos rotores, sendo elas: um rotor acionando outro por contato direto, ou rotores sincronizados por meio de engrenagem.

Para obter uma velocidade menor no rotor fêmea, é mais comum utilizar-se o acionamento do rotor macho. O interior da carcaça é formado por dois cilindros conectados como um oito e os rotores rotacionam-se na mesma.

Sua descarga de ar e admissão estão presentes nas extremidades da câmara. A figura 22 demonstra o ciclo de compressão destes compressores.

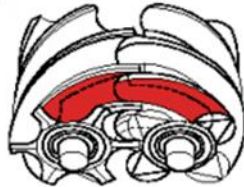
**Figura 22.** Ciclo de Trabalho de um Compressor de Parafuso



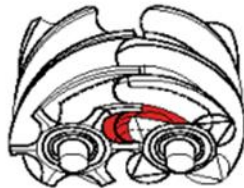
**a** - O ar entra pela abertura de admissão preenchendo o espaço entre os parafusos. A linha tracejada representa a abertura da descarga.



**b** - À medida que os rotores giram, o ar é isolado, tendo início a compressão.



**c** - O movimento de rotação produz uma compressão suave, que continua até ser atingido o começo da abertura de descarga.



**d** - O ar comprimido é suavemente descarregado do compressor, ficando a abertura de descarga selada, até a passagem do volume comprimido no ciclo seguinte.

Fonte: Parker Training

Ocupando espaço entre os rotores encontra-se o ar à pressão atmosférica, que possui o volume compreendido entre eles, isolando-se da admissão. Adiante, decrescendo, dá-se início à compressão. Fazendo com que a descarga seja vencida e o ar flua por essa saída continuamente sem pulsações. Para que o motor não tenha retorno de ar e que o fluido não trabalhe como motor, deve-se colocar uma válvula de retenção no tubo de descarga. A figura 23 demonstra um corte parcial em um compressor de parafuso.

**Figura 23.** Corte parcial em um compressor de parafuso



Fonte: BlogAr.

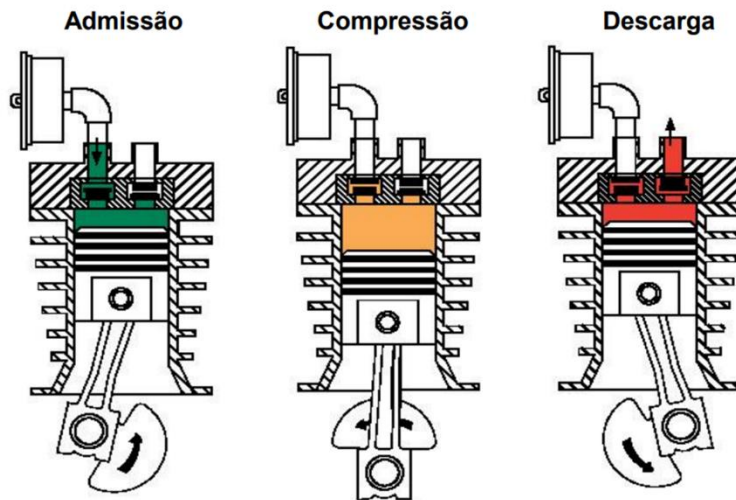
#### 2.3.4.2.2 Compressores de Pistão

##### 2.3.4.2.2.1 Compressor de Simples Efeito (S.E.) ou Compressor Tipo Tronco

Este nome é cabível em função do mesmo apresentar apenas uma câmara de compressão, em outras palavras, apenas a superfície superior do êmbolo admite o ar e comprime o mesmo, a câmara oposta, por sua vez, encontra-se interligada ao cárter. O êmbolo está conectado ao virabrequim via uma biela, denominando-se então o sistema como “tronco”, que possibilita um deslocamento alternativo de vai e vem ao êmbolo, acarretando um empuxo transferido ao cilindro de compressão, sendo ilustrado pela figura 24.

Dando início à movimentação descendente, a aspiração do ar se dá por meio de válvulas de admissão, fazendo todo preenchimento de sua câmara de compressão. Temos início então com o movimento de subida da compressão. Depois de aumentar de forma eficaz a sua pressão, ocorre a abertura da válvula de descarga e o ar é liberado para o sistema.

**Figura 24.** Ciclo de Trabalho de Compressores tipo Tronco



Fonte: Parker Training

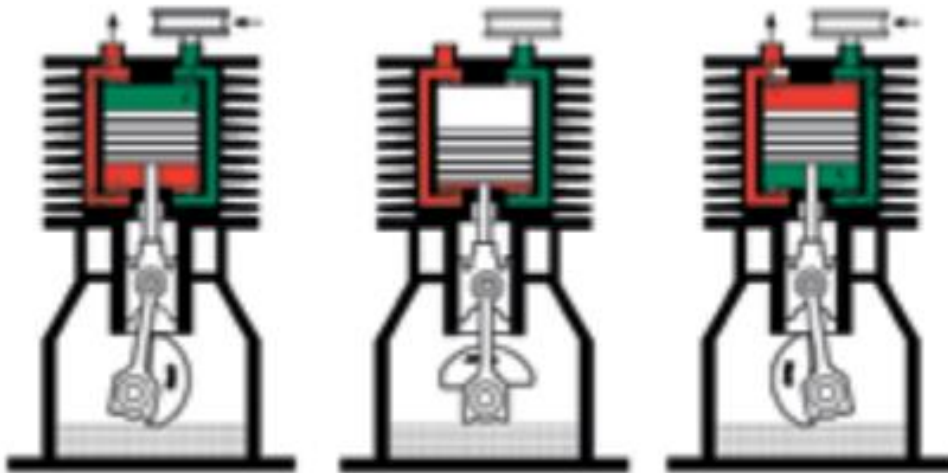
#### 2.3.4.2.2 Compressor de Duplo Efeito (D.E.) – Compressor Tipo Cruzeta

O nome desses compressores é dado por obterem duas câmaras, ou seja, as extremidades do pistão aspiram e comprimem. A ligação da cruzeta e biela se obtém pelo virabrequim; a cruzeta, por sua vez, está conectada ao pistão por uma haste. Com isto é possível transferir movimento alternado ao pistão, e cessa-se a transferência da força de empuxo ao cilindro de compressão, e sim para as superfícies que servem como guia da cruzeta.

O pistão possui um movimento descendente, e fluido é adquirido na câmara superior. No entanto, o fluido contido na câmara inferior é comprimido e removido.

Tendo o movimento contrário, a câmara que realizou a admissão do fluido, realiza sua compressão e a que tinha comprimido realiza a admissão. Esses movimentos são contínuos durante o trabalho. A figura 25 ilustra o sistema previamente descrito.

**Figura 25.** Ciclo de Trabalho de um Compressor de Pistão de Duplo Efeito

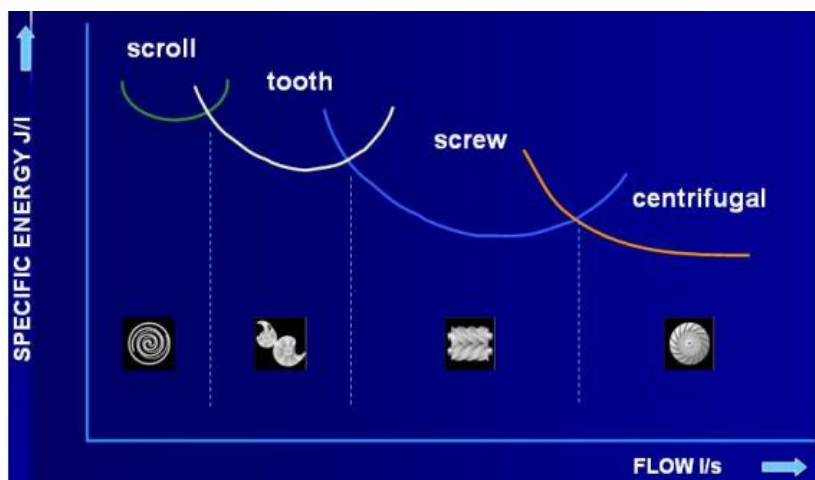


Fonte: Parker Training

### 2.3.4.3 Relação entre Vazão e Energia específica em cada processo de compressão

No Gráfico 1 podemos visualizar as diversas tecnologias de processos vinculados à compressão, relacionando sua respectiva vazão pela energia específica utilizada em cada processo.

**Gráfico 1.** Relação entre Vazão e Energia Específica em cada processo de compressão



Fonte: Atlas Copco, 2006.

## 2.3.5 COMPLEMENTAÇÃO DOS COMPRESSORES

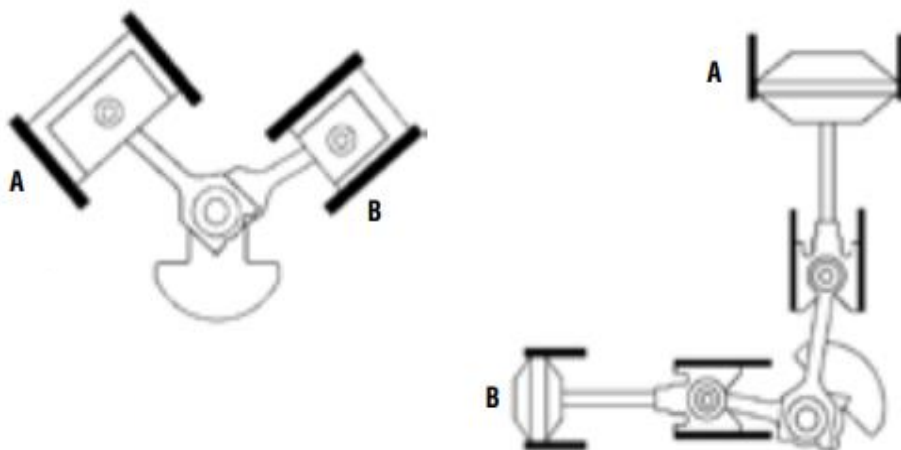
### 2.3.5.1 Cilindros (Cabeçotes)

De maneira geral são fabricados em ferro fundido perlítico, apresentando boa resistência mecânica e características de lubrificação, em função do carbono presente sob a forma de grafita, entre outras características requeridas pelo trabalho que o mesmo será submetido.

### 2.3.5.2 Êmbolo (Pistão)

Há uma variação do seu formato de acordo com a articulação entre o seu formato e a biela. Trabalhando com compressores S.E., a articulação do pé da biela se dá diretamente sobre o êmbolo, conforme demonstrado na figura 26, e este por sua vez sobe provocando empuxo na extremidade do cilindro. Como consequência o pistão terá uma superfície de contato suficiente. Já no caso D.E., o empuxo lateral tem o suporte da cruzeta e o pistão é fortemente preso à haste. Os pistões são, em geral, fabricados de ferro fundido ou ligas de alumínio.

**Figura 26.** Pistão de Simples Efeito à esquerda e Pistão de Duplo Efeito à direita



Fonte: Parker Training

### 2.3.6 SISTEMA DE ARREFECIMENTO DOS COMPRESSORES

Deve-se dar extrema importância ao sistema de refrigeração dos equipamentos, principalmente ao tratar-se de um ou mais compressores, pois afetam diretamente nas linhas de produção de uma empresa, que possuem como finalidade a realização de um produto com qualidade para melhor atender ao cliente. A compreensão sobre arrefecimento ainda é um tema restrito por certas empresas, porém, sua importância vem se mostrando cada vez mais interligada aos produtos finais de determinada linha fabril.

O intuito do arrefecimento consiste em remover o calor proveniente dos próprios estágios da compressão, com a finalidade de se atingir alguns pontos específicos, como:

- Limitar a temperaturas inferiores seus mais diversos componentes, como válvulas, óleo lubrificante e do ar em si que submete-se à compressão, lembrando que conforme a temperatura do mesmo sofre um decréscimo, a umidade do ar é removida;
- Tornar a compressão o mais perto possível da isotérmica;
- Evitar a deformação dos componentes citados anteriormente devido à elevação da temperatura;
- Elevar a eficiência do equipamento.

O então denominado Sistema de Resfriamento compreende duas grandes fases, sendo elas o resfriamento dos cilindros que são submetidos sucessivamente às compressões e o arrefecimento do resfriador intermediário.

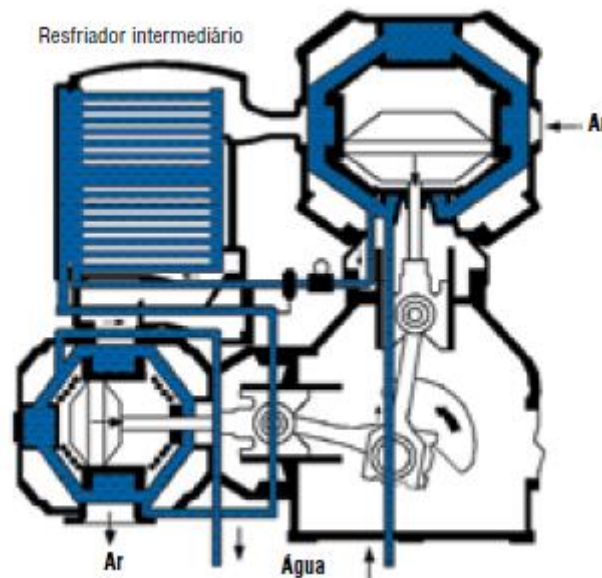
Vale ressaltar que o sistema ideal é aquele onde a temperatura do fluido na descarga do resfriador intermediário é a mesma da admissão do ar, e para tal, pode ser utilizado a refrigeração à ar, ventilação forçada e água, lembrando que o ideal é manter o sistema operando por resfriamento a água, visto que o mesmo possibilita a condensação de umidade, aplicação esta que os demais não proporcionam.

### 2.3.6.1 Refrigeração a Água

Os cilindros apresentam-se prendados de paredes duplas, nas quais a própria água circula entre as mesmas. O resfriamento de maior cautela é encontrado na superfície do cabeçote, pois ele continua em contato com o gás ao final do estágio de compressão.

Ao tratar-se do resfriamento do resfriador intermediário, em geral, é empregado tubos com aletas. O fluido a ter sua temperatura diminuída passa ao redor dos tubos, de modo com que transfiram sua energia térmica (calor) para a água que está em circulação. Este sistema está ilustrado pela figura 27.

**Figura 27.** Sistema de refrigeração a água em um compressor de dois estágios e duplo efeito



Fonte: Parker Training

A seguinte estrutura mostrada na figura 27 é muitas vezes a mais procurada, pois possibilita deste modo uma maior vazão e conseqüentemente maior troca de calor entre os fluidos. Deve-se recordar ao utilizar tal sistema que a água necessita possuir uma temperatura relativamente baixa, pressão suficiente, não possuir impurezas e conter um baixo nível de teor de sais de cálcio ou demais substâncias.

Tal processo de resfriamento é iniciado a medida em que a água circula através da câmara de baixa pressão, e de forma sequencial há o contato da mesma com o resfriador intermediário. Em virtude da diminuição da temperatura produzida no fluxo de ar em decorrência do estágio denominado de baixa pressão, uma importante quantia de umidade é retida, além de se notar o considerável resfriamento do ar.

Logo após, o fluido refrigerante é guiado para a câmara denominada de alta pressão, sendo o mesmo rejeitado do interior do compressor, se deslocando para as chamadas torres e piscinas de refrigeração. Neste estágio, o calor que fora absorvido pela água é eliminado da mesma, tendo como objetivo o reaproveitamento no sistema.

É importante se ter em mente que alguns tipos específicos de compressores precisam de elevada quantidade de água, ou seja, o reaproveitamento não sendo efetuado acarretará num impacto financeiro significativo.

Além do descrito acima, salienta-se que os equipamentos em pauta deste trabalho que possuem seu sistema de arrefecimento a água necessitam de extrema e constante atenção, para que se garanta a ininterrupção do fluido refrigerante, pois, caso contrário, um aumento da temperatura de trabalho do sistema seria facilmente notado, podendo ocasionar em um desgaste prematuro dos componentes e ocasionar parcelas de ineficiência no sistema como um todo.

Em certos compressores são notadas válvulas termostáticas inseridas em seu sistema interposto de refrigeração, que possuem como objetivo assegurar seu correto funcionamento a medida em que as mesmas protegem o equipamento das denominadas temperaturas elevadas, seja por falta de fluido refrigerante ou qualquer outro fator; ou seja, temperaturas maiores do que as especificadas como temperatura de trabalho.

### 2.3.6.2 Resfriamento a Ar

Quando o equipamento em evidência se trata de um compressor de médio ou pequeno porte, a refrigeração a ar torna-se um sistema muito prático, em especial nas instalações ao ar livre ou mesmo naquelas em que o calor possa ser removido de maneira consideravelmente fácil das dependências.

Neste caso, a refrigeração pode ser realizada de duas maneiras, por circulação ou ventilação forçada.

Pelo método da circulação, os cilindros e os respectivos cabeçotes encontram-se aletados com o propósito de resultar em um maior fluxo de calor; ou seja, proporcionar de fato uma maior troca térmica, que é realizada pela passagem do próprio ar ambiente.

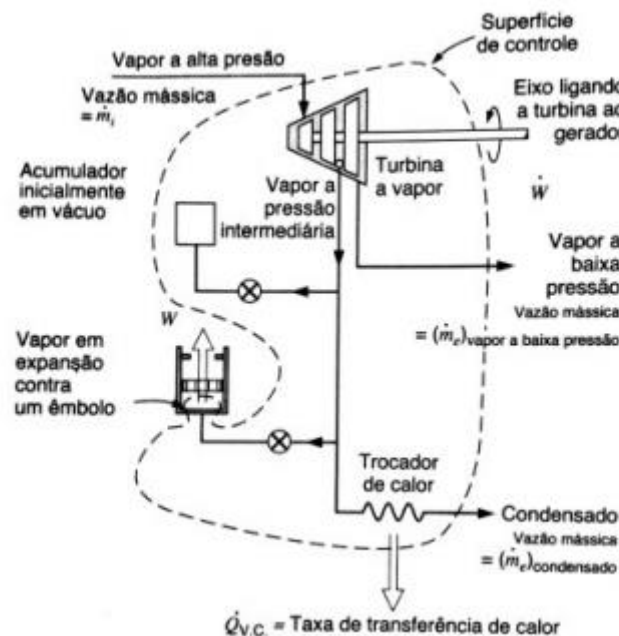
Por sua vez, o método da ventilação forçada consiste em posicionar uma ventoinha de modo que a refrigeração interna dos cabeçotes e do resfriador interposto se dê por meio desta, obrigando, ou seja, forçando o ar circundante a deslocar-se no interior do compressor, e por esse motivo obtém-se o nome de ventilação forçada.

## 2.4 TERMODINÂMICA APLICADA A VOLUMES DE CONTROLE

Segundo os autores Borgnakke / Sonntag (2009), o volume de controle é um volume no espaço que nos interessa estudar ou para analisar um processo. Sua superfície é denominada superfície de controle e é sempre uma superfície fechada, sendo a forma do volume arbitrária, podendo esta ser definida de modo que a análise a ser feita, seja a mais simples possível.

Na figura 28, podemos analisar a forma esquemática do volume de controle, em sua representação as linhas pontilhadas a sua superfície.

**Figura 28.** Diagrama esquemático de um volume de controle



Fonte: BORGNAKKE / SONNTAG, 2013

Se tratando de relações entre calor, trabalho e formas de energia, temos o estudo dessas leis realizando a mudança de um tipo de energia para outra, e das propriedades das substâncias relacionadas entre calor e trabalho. Sua base está definida por formas de observações experimentais, formando leis que sustentam as teses definidas em primeira, segunda e terceira lei da termodinâmica. Vale ressaltar a importância da lei zero, que se caracteriza pelo

equilíbrio térmico entre dois corpos que inicialmente se encontram em temperaturas distintas.

O entendimento do balanço de energia para um volume de controle pode ser obtido pelas diversas parcelas de energia para um sistema fechado, a fim de levar em conta a mudança de energia, sendo tal sistema expresso pela equação (4), que define a primeira lei para volumes de controle, conforme representada abaixo.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = Q - W + m_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - m_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4)$$

Onde:

Q = Taxa de transferência de calor [kW]

W = Potência [kW]

m = Vazão mássica que entra no volume de controle [kg/s]

h = Entalpia na entrada do volume de controle [kJ/kg]

v = Velocidade do fluido [m/s]

Vale ressaltar que os termos “e” e “s” referem-se, respectivamente, à entrada e saída do fluido no volume de controle.

Nota-se que Q e W fazem referência à taxa líquida da própria transferência de energia do sistema, via calor e trabalho, sendo realizada por meio do volume de controle em um determinado instante “t”.

#### 2.4.1 Conservação da massa para um volume de controle

A transferência do fluxo de massa, para um volume de controle em um determinado intervalo de tempo, torna-se igual à própria variação líquida da

massa total dentro do mesmo volume de controle durante o referido intervalo de tempo, conforme notada pela equação (5) da continuidade.

$$\frac{dm}{dt} = \Sigma m_e - \Sigma m_s \quad (5)$$

De forma que os termos  $m_e$  e  $m_s$  são, respectivamente, os valores que entram e saem do volume de controle.

Para um escoamento em regime unidimensional temos a equação (6):

$$\frac{dm}{dt} = \Sigma \rho V_e A_e - \Sigma \rho V_s A_s \quad (6)$$

Onde:

$\rho$  = Massa específica do fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V_e$  = Velocidade que o fluido adentra o volume de controle

$A_e$  = Área da seção transversal de entrada do volume de controle

$V_s$  = Velocidade de saída do fluido do volume de controle

$A_s$  = Área da seção transversal de saída do volume de controle

Ao tratar-se de um escoamento em regime permanente, ou seja, não havendo variação de massa em relação ao tempo, não há variação de massa em relação à entrada do fluido e saída do mesmo no referido volume de controle, conforme a equação (7).

$$\Sigma m_e = \Sigma m_s \quad (7)$$

#### 2.4.2 Rendimento de um compressor

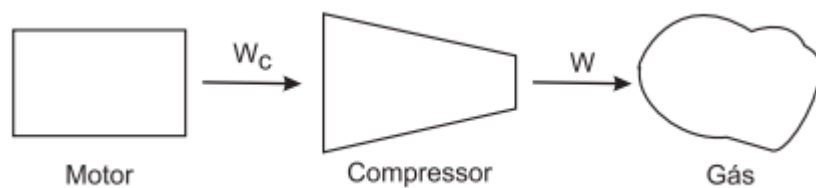
Um equipamento real deve-se aproximar de um comportamento ideal, visando a eficiência energética de um sistema, para que não haja perdas. Para identificar a eficiência energética deveríamos levar em consideração a quantidade de energia útil contida no ar comprimido pela quantidade de energia gasta. Temos o rendimento do compressor baseado nos rendimentos: termodinâmico “ $\eta_{th}$ ” e mecânico “ $\eta_c$ ”, conforme equação (8).

$$\eta = \eta_c \cdot \eta_{th} \quad (8)$$

##### 2.4.2.1 Rendimento Mecânico “ $\eta_c$ ”

O atrito mecânico provoca no sistema dissipações que decorrem da transmissão de energia do acionador para o compressor. O rendimento mecânico então é parcialmente fornecido ao gás, conforme mostrado na figura 29.

**Figura 29.** Esquema de transferência de energia ao gás



Procel, 2005.

Para obter esses resultados nos cálculos da compressão, é utilizado o rendimento mecânico  $\eta_{mec}$ , de acordo com Procel (2005), com valores normalmente entre 0,92 e 0,98. Sua definição é dada pela equação (9).

$$\eta_c = \frac{W}{W_c} \quad (9)$$

Onde:

W – Trabalho efetivamente transferido ao gás;

$W_c$  - Trabalho realizado pelo compressor.

Essa definição pode também ser apresentada em termos das potências consumidas.

#### 2.4.2.2 Rendimento Termodinâmico “ $\eta_{th}$ ”

Através dos equipamentos operando sob forma ideal, podemos caminhar para obter a eficiência desses processos na prática da engenharia, que, segundo Borgnakke / Sonntag (2009), consiste na relação entre o trabalho utópico e o real.

Portanto, no dia a dia da engenharia, para facilitar a análise de eficiência desses equipamentos e dispositivos, são muito utilizados os modelos reversíveis como parâmetro de referência para a eficiência dos dispositivos, máquinas ou processos reais, isto é, não reversíveis. Podemos dizer então que em uma máquina onde ocorre um processo, a eficiência será a comparação entre o desempenho real em dadas condições e o desempenho ideal que ela teria em dado processo.

Para os compressores de ar ou de outros gases, há dois processos ideais para comparação com o processo real. Não sendo feito nenhum esforço para a refrigeração do gás durante a compressão, consistindo em um processo adiabático, o processo ideal é um processo adiabático e reversível, ou isentrópico, entre o estado de entrada e a pressão de saída.

O rendimento termodinâmico pode então ser obtido pela razão do trabalho de compressão real (processo politrópico) de um gás perfeito e compressão teórico (processo adiabático reversível ou isentrópico). O rendimento

termodinâmico “ $\eta_{th}$ ” associado a um processo real de compressão é dado pela equação (10).

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W} \quad (10)$$

Onde:

$W_{th}$  - Trabalho ideal por unidade de massa, a ser calculado a partir de  $\int v dp$  ao longo de um processo ideal; [kJ/kg]

$W$  - Trabalho real por unidade de massa efetivamente empregado na compressão. [kJ/kg]

#### 2.4.2.2.1 Trabalho ideal de um compressor “ $W_{th}$ ” (processo isentrópico)

O trabalho ideal “ $W_{th}$ ” é descrito conforme a equação (11).

$$W_{th} = P_1 \cdot v_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (11)$$

Ou:

$$W_{th} = R \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (12)$$

Onde:

$W_{th}$  = trabalho ideal realizado pelo compressor

$P_1$  - pressão do ar na admissão [bar]

$v_1$  - volume específico do ar na admissão [ $m^3/kg$ ];

$T_1$  - temperatura do ar na admissão [K];

$P_2$  - pressão do ar na descarga [bar];

$T_2$  - temperatura do ar na descarga [K];

$R$  - 0,287 [kJ/kg.K];

$n = \lambda = 1,4$  (ar em condições ambiente e processo adiabático).

Segundo Borgnakke / Sonntag (2009), os compressores operando de maneira isentrópica devem ter o seu rendimento entre 70 e 85%, sendo que os compressores de grande porte normalmente apresentam eficiências isentrópicas maiores que aquelas dos compressores pequenos.

#### 2.4.2.2.2 Trabalho real de um compressor “W” (processo politrópico).

Podem ser obtidos os parâmetros através do compressor atuando de forma real, esses por sua vez a serem medidos são:  $P_1$ ,  $v_1$ ,  $T_1$ ,  $P_2$ ,  $v_2$ ,  $T_2$ . De acordo com as equações (13), (14) e (15), obtém-se a equação (16).

$$P_1 \cdot v_1^n = P_2 \cdot v_2^n \quad (13)$$

Onde:

$$P_1 \cdot v_1 = RT_1 \quad (14)$$

$$P_2 \cdot v_2 = RT_2 \quad (15)$$

Deduzindo-se que:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (16)$$

Logo, substituindo o valor de “n” na equação (13), obtém-se o trabalho real do compressor, e, conseqüentemente, o rendimento termodinâmico “ $\eta_{th}$ ” de acordo com a equação (10).

#### 2.4.3 Potência de compressão

Os compressores são máquinas caracterizadas termodinamicamente como volumes de controle, onde o desempenho do mesmo há de ser analisado via identificação dos fluxos de energia. Em função do prescrito, serão feitas mais referências à potência do que ao próprio trabalho de compressão. A potência requerida pelo compressor pode ser obtida de acordo com a equação (17).

$$W_c = \frac{\dot{m} \cdot W_{th}}{\eta_{th} \cdot \eta_{mec}} \quad (17)$$

Onde:

$\dot{m}$  = Vazão mássica do gás [kg/s];

$W_{th}$  = Trabalho ideal por unidade de massa [kJ/kg];

$\eta_{th}$  = Rendimento termodinâmico;

$\eta_{mec}$  = Rendimento mecânico;

$W_c$  = Potência requerida pelo compressor [kW].

## 2.5 Tipos de Volume

### 2.5.1 Volume de Ar Livre $V$ ( $m^3$ )

O volume de ar comprimido como o volume de ar livre é definido à pressão absoluta de 1 bar, sendo igual nas condições de uma pressão manométrica e temperatura de 0 bar e 20°C.

### 2.5.2 Volume Normal $N$ ( $m^3$ )

É definido pela medição do volume de ar, com as seguintes condições: pressão absoluta e pressão atmosférica de 1,013 bar e temperatura de 0°C, respectivamente.

### 2.5.3 Volume Efetivo $V_e$ ( $m^3$ )

É representado nas condições reais de compressão, obtidas na temperatura e pressão de trabalho.

## 2.6 INTRODUÇÃO AOS SÍMBOLOS GRÁFICOS DA ANS PARA COMPONENTES PNEUMÁTICOS

No passado, a utilização de símbolos e diagramas diferentes, mostrou ser uma prática inconveniente e problemática, havendo a necessidade então da criação de padronização desses símbolos.

Devido à essa situação, foram realizadas diversas conferências afins de abordar novos padrões de símbolos para materiais pneumáticos e hidráulicos.

A representação de ligações, trajetórias de fluxo, e funções de componentes são utilizadas em símbolos. A indicação dos símbolos ocorre da passagem de um arranjo de um percurso de fluxo para outro.

Quando se trata do sentido de locomoção das volutas, a posição de elementos de controle relacionados a componentes efetivos, os símbolos são descartados. Por exemplo, para indicar construção, valores de pressão e vazão, os símbolos da mesma forma não são utilizados.

A simbologia atual é estabelecida conforme a norma regulamentadora NBR 8898, Símbolos gráficos para sistemas hidráulicos e pneumáticos – Distribuição e regulação da energia.

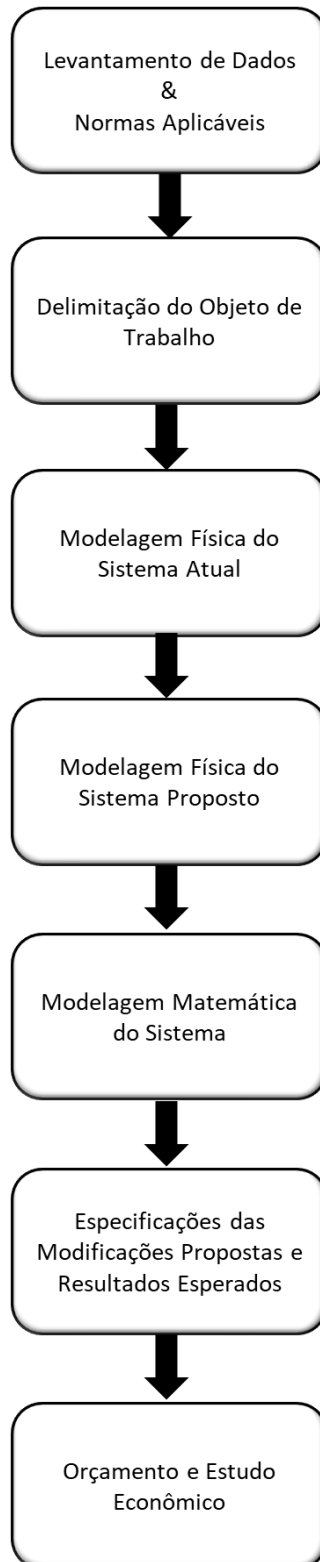
## 2.7 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA “C” (kWh/m<sup>3</sup>)

O consumo específico trata-se de um índice que serve como referência para se medir a eficiência de um determinado compressor. Em termos práticos, a potência para a compressão (kW) e a vazão (m<sup>3</sup>/h) são necessárias para seu cálculo.

O consumo específico de energia é dado pela razão entre a potência de compressão pela respectiva vazão do sistema.

### 3.0 METODOLOGIA

**Figura 30.** Diagrama de Blocos



Fonte: Autoria própria

De acordo com o diagrama de blocos apresentado na figura 31, identifica-se o seguimento que será abordado como metodologia para realização deste projeto, os principais tópicos a serem discutidos e elaborados para que se possa provir uma melhoria no sistema de ar comprimido, cujo próprio trabalho se propõe.

### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E NORMAS APLICÁVEIS

Para que se torne possível a implantação de um determinado projeto, necessita-se saber os pontos significantes para melhoria do respectivo sistema a ser avaliado. Este projeto de redução de custo em função dos vazamentos inerentes aos condutos, por onde o ar comprimido se desloca, também trará tal perspectiva para sua execução.

Os pontos a serem avaliados e seus respectivos dados apurados no sistema de circulação do ar comprimido serão diversos, tais como pontos específicos de vazamento do sistema, pressão de trabalho do sistema, pressão máxima e mínima de trabalho permissível, vazão nominal dos compressores atuantes, custo energético mensal necessário para sustentar tais vazamentos além das utilizações padrões da empresa, mão de obra necessária para execução das tarefas a serem tomadas, entre outros, que serão discutidos mais afrente.

No que diz respeito a um setor tão delicado como o de sistema de ar comprimido, há seguranças que precisam ser levadas em consideração, e para que isso ocorra de forma padrão; ou seja, por parte de todos, existem normas de segurança que regem tal sistema, para que seja obtido um projeto mais seguro. Logo, voltado a necessidade deste trabalho, fora filtrado diversas normas que serão essenciais para seguirmos com o projeto, sendo elas:

De acordo com maquinário:

- EN 1012-1 Compressores e bombas de vácuo – Requisitos de segurança

- EN ISO 12100-1:2003 AMD 1 2009, Segurança do Maquinário – Conceitos básicos, princípios gerais para o projeto – Parte 1: Terminologia Básica, Metodologia
- EN ISO 12100-2:2003 AMD 1 2009, Segurança do Maquinário – Conceitos básicos, princípios gerais para o projeto – Parte 2: Princípios Técnicos

Da segurança do equipamento de pressão:

- Diretiva da UE 87/404/EC, Recipientes sob pressão simples
- Diretiva da UE 97/23/EC, Equipamentos de Pressão, referindo-se às seguintes normas:
  - EN 764-1 a 7, Equipamentos de pressão
  - EN 286-1 a 4, Recipientes sob pressão simples não submetidos à ação da chama, destinados a conter ar ou nitrogênio

Da adequação ao meio ambiente:

- Diretiva da UE 2000/14/EC, Emissão de Ruído em Área Aberta, referindo-se às seguintes normas:
  - EN ISO 3744:2009, Determinação dos níveis de potência sonora de fontes de ruído usando pressão sonora – Método de engenharia
  - EN ISO 2151:2004, Código de teste de ruído para compressores e bombas de vácuo – Método de engenharia
- Diretiva da UE 2004/26/EC, Norma de emissões para motores não rodoviários – Nível III implementado entre 2006 e 2013, Nível IV a partir de 2014
- Norma de Emissões Federais dos EUA para motores não rodoviários – Nível III implementados entre 2006 e 2008, Nível IV entre 2008 e 2015

Da segurança elétrica:

- Diretiva da UE 2004/108/EC, Compatibilidade Eletromagnética, referindo-se às seguintes normas:
- NR 10 – SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE
- EN 61000-6-2:2005, Compatibilidade eletromagnética (EMC) - PARTE 6-2: Padrões Genéricos - Imunidade para Ambientes Industriais
- EN 61000-6-4:2006, Compatibilidade eletromagnética (EMC) - PARTE 6-4: Padrões Genéricos – Padrões de emissão para Ambientes Industriais
- Diretiva da UE 2006/95/EC, Equipamento de Baixa Tensão, referindo-se às seguintes normas:
- EN 60034 - Parte 1 a 30, Máquinas Elétricas Rotativas – Classificação e Desempenho
- EN 60204-1:2009, Segurança do Maquinário - Equipamentos Elétricos de Máquinas – Parte 1: Requisitos Gerais
- EN 60439-1:2004, Conjuntos de baixa tensão e mecanismos de controle – Parte 1: Conjuntos testados e parcialmente testados

### 3.2 DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE TRABALHO

O projeto tem como intuito o apontamento e conseqüente redução das perdas provenientes dos vazamentos de fluido comprimido das tubulações que se estendem por todo o sistema de ar comprimido, em função das aplicações industriais. Vale ressaltar que as análises que serão realizadas neste projeto, tal como as subseqüentes melhorias, podem ser generalizadas para qualquer

sistema de ar comprimido, levando em consideração as respectivas particularidades de cada caso.

### 3.3 MODELAGEM FÍSICA DO SISTEMA

Levando em consideração que o modelo físico deve ser o mais simples possível, ao mesmo tempo em que represente nosso sistema com fidelidade suficiente para que se cumpram os objetivos propostos pelo projeto, será estabelecido e representado a esquematização física do sistema de ar comprimido, tal como a representação e descrição de seus vários componentes, como por exemplo: compressores atuantes, válvulas existentes nas tubulações, filtros, purgadores, reservatórios, separadores de condensados, e quantificação das grandezas que norteiam o funcionamento do sistema, incluindo vazões, pressões, perdas, potências, rendimentos e eficiência.

### 3.4 MODELAGEM FÍSICA DO SISTEMA PROPOSTO

Para que seja possível a realização de uma previsão das melhorias obtidas no sistema a partir deste projeto, será realizada a modelagem física do sistema que se deseja obter, a fim de se permitir o comparativo com a modelagem física do sistema que o antecedia, evidenciando os ganhos planejados, tais como os componentes que foram submetidos à mudança ou adaptação.

### 3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

Analisando um sistema de ar comprimido e se tratando de modelagens matemáticas de um sistema, torna-se necessário o equacionamento de todas as partes do mesmo, objetivando a interação entre as partes teóricas, como eficiências, potências nominais e efetivas, pressões de trabalho, pressões máximas e mínimas admissíveis e vazão do sistema com o sistema que se deseja propiciar. Esta modelagem, por sua vez, será realizada tanto para o sistema atual quanto ao pós-modificações.

### 3.6 ESPECIFICAÇÃO DAS MODIFICAÇÕES PROPOSTAS E RESULTADOS ESPERADOS

Modificações e adaptações são necessárias para que se possa provir um resultado que difere da atual rede de ar comprimido, para que se possa aprimorar o rendimento do sistema, via redução das perdas geradoras de ineficiência. Estas mudanças a serem realizadas baseiam-se na necessidade da obtenção de resultados mais abrangentes, que ocasionariam em um sistema mais fluído, sem grandes interrupções e perdas, conforme previamente mencionado.

### 3.7 ORÇAMENTO E ESTUDO ECONÔMICO

Uma inovação, visando ganho de produção ou uma melhoria no sistema, um novo tipo de processo ou produto, tem sempre como intuito um retorno financeiro, seja ele a curto, médio ou longo prazo. Ao se ter uma ideia de um novo projeto, é predefinido que antes de se investir é necessário o entendimento do que se trata com base em sistemas físicos e matemáticos, para que se tenha uma segurança maior do capital que estará sendo proposto, além do retorno que este trará.

## **4.0 DESENVOLVIMENTO**

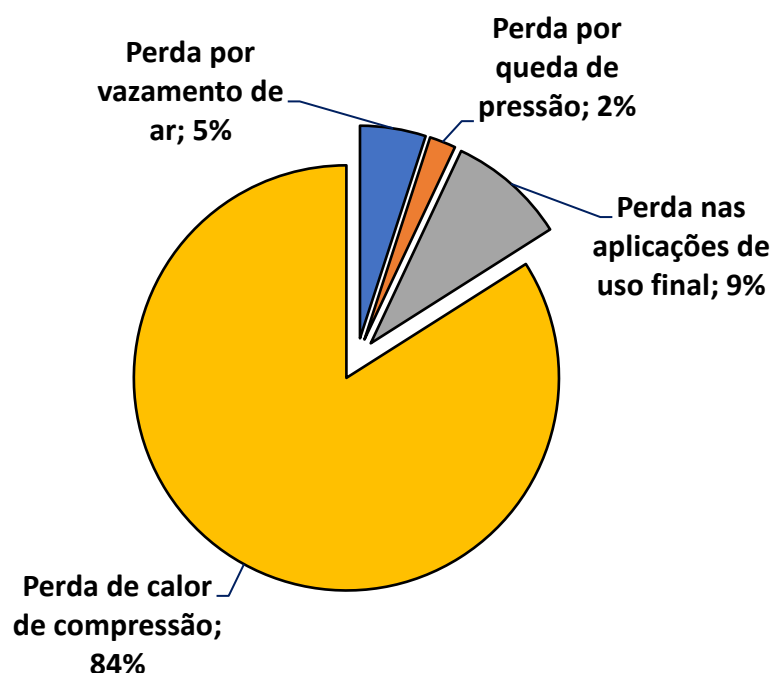
Visando a implantação das ações de melhoria no sistema de ar comprimido, necessita-se realizar o levantamento das possíveis causas de ineficiência, e assim elaborar um plano para melhoria contínua do sistema, sendo que cada impacto há de ser levado em consideração, para que se identifique a necessidade de um reinício do plano de ação ou concluir que a ação adotada tenha sido eficiente.

### **4.1 IDENTIFICANDO AS PRINCIPAIS PERDAS DE EFICIÊNCIA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO**

Em diversas circunstâncias, uma única parada não programada da sua produção pode vir a acarretar uma série de prejuízos à sua empresa, desde atrasos nas entregas previstas, até problemas de eficiência energética, desperdícios de matéria-prima, falhas em seus equipamentos e gastos excedentes com manutenção. Visando restringir os problemas citados, a atenção com a sua rede de ar comprimido torna-se um dos cuidados mais importantes.

Existem diversos fatores causadores de ineficiência em um sistema de ar comprimido, conforme apresentado na figura 31. Alguns principais causadores de ineficiência no sistema serão abordados e discutidos neste trabalho.

**Figura 31.** Perdas comuns em um sistema de ar comprimido



Fonte: Procel (2005).

Levando em consideração as leis da termodinâmica, a energia empregada para compressão do ar, é absolutamente alterada em calor. A maior parte deste calor (mais de 90%), é absorvida pelo próprio ar comprimido e pelo óleo de lubrificação. Uma pequena porcentagem desta energia é liberada ao ambiente. Todavia, a energia elétrica não é única matriz energética que entra no sistema.

O ar recebido no processo comporta vapor de água, que contém energia molecular acondicionada ao passo que o vapor é condensado. Tal energia é então transferida ao sistema de refrigeração do compressor. Esta quantidade corresponde a cerca de 5 a 20% do total de energia elétrica. (Fonte: Blogar edição número 13).

#### 4.1.1 REDUÇÃO DE PERDAS EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE TRABALHO

Um dos fatores que afetam significativamente o consumo de energia é a pressão de trabalho, que se aumentada pode elevar também esse consumo de energia. A aplicação de válvulas redutoras é imprescindível em situações que na

mesma instalação, nos pontos de consumo existem diferentes pressões, essa válvula fará com que a necessidade de uma pressão de descarga maior seja suprida e não afetará a linha como um todo. Outro modo de sanar essa situação seria a instalação de compressores com diferentes vazões e pressões para que possa atender a diferentes solicitações de operação do mesmo sistema.

Ao definir a pressão de trabalho do sistema é necessário que se coloque em evidência os equipamentos consumidores mais as perdas da rede entre a geração e o consumo. Não deixando de lado o traçado que será utilizado nas tubulações da distribuição, as válvulas, os filtros, secadores de ar etc. A pressão final deve ser a menor a fim de vencer as barreiras ao fluxo do ar pelas tubulações e atendendo os consumidores finais.

No controle de liga/desliga do compressor existe o pressostato que controla e regula o desarme da pressão de trabalho do sistema, sempre ajustada de forma que esteja próxima a pressão que é utilizada na linha. Essa regulação é de extrema importância para o sistema, pois uma vez que regulada muito acima da pressão necessária na linha, faz com que o compressor trabalhe por mais tempo e até mesmo não tenha seu período de alívio em nenhum momento, fazendo com que tenha um consumo de energia elétrica enorme.

Para controle de fins efetivos de desarme temos uma diferença de no máximo 0,8 bar entre a pressão média de trabalho no ponto mais distante do sistema e a pressão que se ajusta no pressostato. Diferença essa que corresponde às perdas de carga máximas que são adotadas para projetos de sistemas de ar comprimido, para os pontos de trabalho mais distantes, não deixando de lado os fatores de segurança.

#### 4.1.2 REDUÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DA TEMPERATURA DO AR ASPIRADO PELO COMPRESSOR

Com o decaimento da temperatura de aspiração do compressor, menor estará a energia fundamental para sua compressão. Conforme sugestão pode-se dizer, em torno de 4°C de aumento na temperatura do ar de aspiração, o uso de energia sobe em 1% para conseguir o mesmo volume produzido, sabendo

que para cada 3°C de baixa da temperatura do ar aspirado, acrescenta-se cerca de 1% na capacitação do compressor para um mesmo consumo.

De acordo com a diminuição da temperatura do ar aspirado, obteremos uma maior quantidade de massa de ar, podendo ser aspirada através do compressor, tendo mesma vazão volumétrica aspirada e uma potência consumida de igual intensidade, pois o ar é mais denso e mais frio. Logo, se obtém maior massa de ar que ocupará o mesmo volume do que quando comparado ao ar mais aquecido. Entretanto, é de grande importância evitar que os compressores aspirem ar no interior do ambiente onde permanecem estabelecidos, logo, sua temperatura será mais elevada do que a do ar atmosférico externo.

Em nexos pode-se disponibilizar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar do exterior da divisão de equipamentos.

Logo, sugere-se que a tomada de aspiração de ar seja realizada do exterior da divisão de compressores. Sendo crucial canalizar a tomada de ar, deve-se dimensionar com grande diâmetro, de maneira curta e reta, sendo indispensável que o filtro seja mantido limpo, assim a perda de carga de aspiração será a menor possível.

Em instalações onde o equipamento é resfriado a ar, é normal dispensar para o exterior o ar aquecido do resfriamento. É de grande importância o cuidado para que o ar não aqueça o ar de aspiração do equipamento.

A Tabela 3 estabelece a relação entre as temperaturas do ar aspirado e os percentuais de potência economizados ou incrementados, tendo como base a temperatura de 21°C. Em situações com valores diferentes aos valores descritos na tabela, estes podem ser interpolados.

**Tabela 3.** Variação do consumo com a temperatura de aspiração

TEMPERATURA DO AR DE ASPIRAÇÃO	POTÊNCIA ECONOMIZADA OU INCREMENTADA
(°C)	Temperatura de referência 21°C
-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: Procel, 2005.

#### 4.1.3 REDUÇÃO DE PERDA DE CARGA POR SUJEIRA NO FILTRO DE ASPIRAÇÃO

O ar atmosférico recebido através de compressor de ar, embora sendo filtrado à entrada (filtro primário), comporta diversas impurezas, invisíveis a olho nu. Dentre elas, podemos ressaltar duas determinantes: vapor de água (umidade) e particulados (poeiras). Toda instalação de ar comprimido porta (ou deveria portar) um filtro de ar na aspiração (filtro primário) para conter a entrada de grandes partículas e sujeiras carregadas pelo ar atmosférico. Não existindo uma manutenção planejada no filtro, a sujeira se acumulará, fechando, parcial ou até totalmente os poros do filtro, gerando aumento da perda de carga no filtro, aparentando a elevação do consumo de energia do motor de acionamento do compressor para a execução do mesmo serviço que procederia com o filtro limpo.

#### 4.1.4 REDUÇÃO DE PERDAS PELA ESCOLHA DO TIPO DE COMPRESSOR

Compressores são utilizados para permitir a aumento da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos sistemas industriais, o aumento de pressão requerida pode oscilar cerca de 1,0 atm até centenas de atmosferas. Existe a denominação “sopradores” para denotar os equipamentos que operam com elevação de pressão muito pequena, porém superior aos marcos normais dos ventiladores. Esses equipamentos contêm características de funcionamento específico dos compressores, porém são incorporados em simplificações de projetos compatíveis contendo sua utilização.

A determinação do tipo de compressor a ser utilizado é feita de acordo com a seleção propriamente dita do equipamento e engloba diversos aspectos. Obtendo uma análise que demonstre as características previstas no processo de compressão, capaz de demonstrar as faixas de operação, conseguindo estabelecer o tipo de compressor mais adequado e conseqüentemente, ser obtido nas linhas de produção do fabricante.

De acordo com a Tabela 4, a pressão de descarga, a vazão volumétrica aspirada e a relação de compressão, são padrões que traduzem as limitações impostas a cada modelo de compressor e suas características construtivas.

**Tabela 4.** Faixas 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)

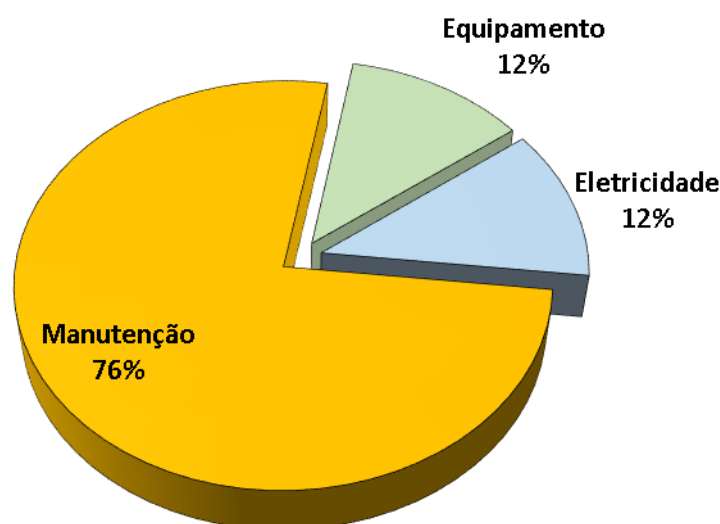
Fonte: Procel, 2005.

Na construção das primeiras máquinas de compressão de gases temos os compressores alternativos que foram iniciados no século passado. Desde o início vínhamos utilizando desses compressores até o meio desse século, compressores que ainda proporcionavam vazões muito baixas, a partir desse ponto muitas indústrias de grande porte começaram a ser construídas, então compressores de todas faixas de aplicação chegaram para concorrer com esses antigos, à exceção daqueles que proporcionavam altas pressões de descarga e baixas vazões. Mediante a tabela 2.2, temos que destacar que as vazões de 250 m<sup>3</sup>/min, provém de compressores alternativos poli cilíndricos de grande porte, mesmo que forneçam vazões baixas no âmbito industrial.

Vale ressaltar que a escolha baseada no custo inicial pode acarretar decisões inadequadas.

Tem-se que o custo inicial do equipamento é cerca de 12% do custo total que irá ser gasto na vida útil de um compressor, contemplando assim 12% para manutenção e o restante estando em função de custos com energia elétrica, conforme representado na figura 32.

**Figura 32.** Custo efetivo de um compressor ao longo de 10 anos de uso



Fonte: Procel, 2005.

#### 4.1.5 REDUÇÃO DE PERDAS POR VAZAMENTO

Ao tratar-se da quantidade de ar perdido por um simples furo que acarreta em um determinado vazamento em uma rede de ar comprimido, o custo pode não ser tão significativo, porém, quando se tem em mente os mais diversos furos ao longo da tubulação, tais como seus distintos diâmetros, torna-se crítica à análise do somatório dos mesmos no sistema, vedações com desgaste, junções defeituosas e outros fatores que preponderam o vazamento, pois todos os citados anteriormente são geradores de ineficiência.

Quando analisamos um vazamento de forma isolada, podemos obter resultados que não demonstram um índice excessivo de perda de energia, porém com vários pontos com o mesmo tipo de vazamento, mesmo que minúsculos, esses estão diretamente ligados a elevados custos de energia mediante a utilização mensal/anual do sistema.

O consumo do equipamento nos mostra de forma efetiva a importância econômica em relação à perda contínua de ar. As tabelas 5, 6 e 7, de diferentes fabricantes, nos fornecem um valor de potência consumida para a compressão do ar comprimido que está sendo inutilizável pelo sistema, via vazamentos.

**Tabela 5.** Valores de potência consumida para compressão do ar.

Orifício	Pressão x Vazão m <sup>3</sup> /min			Potência necessária em kW @ 6 bar (87 PSI)
	4 Bar	5 Bar	6 Bar	
1 mm	0,045	0,054	0,065	0,48
3 mm	0,408	0,491	0,574	4,28
5 mm	1,135	1,364	1,593	11,88

Fonte: Spraying Systems Co.

**Tabela 6.** Valores de potência consumida para compressão do ar.

Diâmetro do furo		Escape do ar em			Potência necessária para compressão	
		588,36 kPa	6 bar	85 psi		
mm	pol	m <sup>3</sup> /s	l/s	c.f.m	CV	kW
1	3/64	0,001	1	2	0,4	0,3
3	1/8	0,01	10	21	4,2	3,1
5	3/16	0,027	27	57	11,2	8,3
10	3/8	0,105	105	220	44	33

Fonte: Training Parker.

**Tabela 7.** Valores de potência consumida para compressão do ar.

Diâmetro do Furo (mm)	VAZAMENTO EM l/min	POTÊNCIA GASTA PARA COMPRESSÃO	
	PRESSÃO DE TRABALHO 0,6 Mpa	CV	kW
1	60	0,4	0,3
3	600	4,2	3,1
4	1600	11,2	8,3
10	6300	44	33

Fonte: SMC.

Tomando como base os valores apresentados pelas tabelas, torna-se nítido o gasto de energia em excesso quando avaliado o seu sistema como um todo.

#### 4.1.6 REDUÇÃO DE PERDA VIA DRENAGEM DE CONDENSADO

Quando se trata de compressão de ar comprimido, sempre haverá sucção conjunta de água (condensado). No reservatório o condensado sendo de massa molecular superior à do ar comprimido, este por sua vez é coletado no fundo do reservatório, tendo seu decaimento pelas paredes. Com o decorrer do tempo, as paredes acabam sofrendo com a oxidação, com isto, vemos a importância da galvanização de toda estrutura interna do reservatório a fim de reduzir este problema. Este condensado então deve ser drenado de forma constante e regular, não sendo essencial a galvanização, mas recomendada. Quando o sistema utiliza de agentes agressivos é imprescindível a galvanização de toda a linha bem como o reservatório.

Ao trabalharmos com sistemas pneumáticos, o condensado em qualquer circunstância deverá ser drenado. Caso contrário, todo o sistema se torna prejudicado, pois com o decorrer do tempo ele irá inundar toda a tubulação, fazendo com que o ar o transporte por onde for. Esta coleta ou drenagem tem um custo obrigatório operacional. A formação do condensado é evidente que não ocorre em regime constante. A umidade que é aspirada pelo compressor é o principal agente desse condensado no sistema.

##### 4.1.6.1 SELEÇÃO DOS TIPOS DE DRENAGEM PARA CONDENSADO

Em virtude da seleção do melhor sistema de drenagem, precisa-se observar o tipo e a condição de formação do condensado. Alguns dos principais fatores que não de ser levados em conta estão descritos abaixo.

- Condensados muito agressivos;
- Condensados pastosos;

- Áreas com atmosfera explosiva;
- Sistemas com pressões muito baixas;
- Sistemas com pressões muito elevadas.

Os principais métodos para drenagem de condensados nas situações mostradas acima, são:

- Drenagem por meio de válvulas manuais;
- Drenagem com controle de nível;
- Drenagem por meio de válvulas magnéticas de comando temporizado;
- Drenagem utilizando medição eletrônica de volume ocupado;
- Drenagem utilizando boia para controle de nível.

Vale a ressalva de que cada método prescrito possui suas particularidades, seus benefícios e cabíveis aplicações, variando de acordo com cada sistema o melhor método de drenagem do condensado.

#### 4.1.7 REDUÇÃO DE PERDAS PELO TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Conforme o avanço tecnológico dos equipamentos industriais, tornou-se imprescindível que, para a correta utilização do ar comprimido, o mesmo esteja isento de impurezas, seco e até mesmo, em algumas aplicações, esterilizado. Por sua vez, tais impurezas não são visíveis a olho nu, o que pode vir a acarretar em uma redução da performance do funcionamento dos diversos equipamentos pneumáticos, que trabalham em função deste ar comprimido, gerando em diversas situações falhas e imperfeições nos produtos finais que necessitam de ser entregue ao cliente.

Ao analisar a composição do ar atmosférico, constatou-se que em média, 1,0 m<sup>3</sup> contém mais de 180 milhões de partículas, variando seus tamanhos entre 0,01 e 100 µm, com massa específica entre 5 a 40 g/m<sup>3</sup> de água no ar. Nota-se também que, de forma natural, exista em seu meio, partículas de lubrificantes (óleo) em suspensão, variando na base de 0,01 a 0,03 mg/m<sup>3</sup> de ar.

Em algumas aplicações, podem ser encontrados traços de materiais pesados, como os mais diversos metais, por exemplo: cádmio, mercúrio, ferro e chumbo.

Após realizada a compressão do ar, o volume ocupado por ele é reduzido, e tais concentrações de impurezas aumentam de maneira drástica. Tomando como exemplo uma compressão na base de 10 bar, tais impurezas chegam a aumentar cerca de 11 vezes. Deste modo, o volume de 1,0 m<sup>3</sup> do fluido comprimido, para esta pressão, conterá cerca de, aproximadamente, 2 bilhões de partículas.

#### 4.1.7.1 BENEFÍCIOS OBTIDOS COM O TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

- Os equipamentos consumidores de ar comprimido alavancam sua vida útil;
- Produto final com maior qualidade, acabamento e detalhamento;
- Isenção de sujeiras e condensados nas tubulações pneumáticas;
- Redução de perda em função do mau funcionamento mecânico do ar comprimido, causado por tais impurezas;
- Redução dos tempos inutilizáveis, devido à manutenção corretiva;
- Consumo de energia inferior, estando diretamente ligada à perda de pressão.
- Ao eliminar as resistências ao escoamento do ar, reduz-se as perdas de pressão na distribuição do fluido comprimido.

A presença de partículas impuras e de água no ar atmosférico, quando admitida no sistema de compressão do fluido ar, irá conseqüentemente influenciar em diversas partes do seu sistema, podendo por exemplo, proporcionar um elevado desgaste das tubulações e dos referidos equipamentos pneumáticos, tendendo à redução da qualidade dos produtos finais do processo fabril.

Além dos desgastes provenientes do não tratamento do ar comprimido em seu estado de pré-compressão citados anteriormente, o uso do mesmo sem o cabível tratamento vem a causar danos gravíssimos e prejudiciais à saúde. Logo, após levantado todos estes fatores da importância do tratamento do fluido, torna-se imprescindível a realização de tal cuidado, retirando o máximo possível dos particulados, bem como óleo e água.

#### 4.1.7.2 TIPOS DE TRATAMENTO DO AR COMPRIMIDO

Existem diversos tratamentos que possibilitam o aumento de eficiência do sistema de ar comprimido, estando os principais mencionados abaixo.

##### 4.1.7.2.1 Secagem do ar comprimido

O processo de tratamento do ar comprimido passa pela retirada de vapor d'água do sistema, denominando-se secagem do ar comprimido, oferecendo assim vantagens na sua utilização como qualidade, manutenibilidade e durabilidade. Apesar de existir a possibilidade de utilização de diversos tipos de secadores de ar, os secadores que funcionam na base de condensação, ditos secadores de ar por refrigeração, são, de longe, os mais comuns em indústrias. Alguns métodos de secagem serão descritos abaixo.

##### 4.1.7.2.1.1 Secagem via Aftercooler

Uma das formas de secagem desse ar é por meio de um dispositivo chamado aftercooler ou resfriador posterior, sendo um trocador de calor, que resfria o ar comprimido, fazendo com que o condensado tenha sua precipitação primária, evitando o acúmulo de água nas tubulações. Sua posição no sistema é ideal antes do reservatório e após o compressor. Com uma especificação correta, conseguimos atingir cerca de 80-90% da precipitação desse condensado. Com essa ação elevamos a temperatura do ar comprimido em torno de 10°C, fazendo com que haja a necessidade de um resfriador. Hoje os compressores já veem com esse resfriador em seu conjunto.

#### 4.1.7.2.1.2 Secagem por Refrigeração

A secagem através do processo de refrigeração é aplicada quando se necessita de ar comprimido seco junto a um pequeno custo para adquirir e para sua manutenção.

Com base na sua funcionabilidade, o resfriamento do ar comprimido consiste em um modelo frigorífico constando freon (diversos tipos de gases a base de clorofluorcarbonos) e consequente remoção do condensado proveniente do mesmo.

O ar comprimido saturado entra no secador onde é resfriado no evaporador do ciclo de frio. Durante o processo de arrefecimento, surge à condensação do vapor de água existente no ar comprimido e é executada a extração do condensado no separador de líquidos. Logo após é obtido um leve aquecimento com a entrada do ar comprimido.

As vantagens dos secadores por refrigeração são:

- Ponto de orvalho constante;
- Pouca manutenção;
- Baixo custo de operação;
- Não é danificado por vapores de óleo ou aerossóis.

A desvantagem, de um modo geral, é:

- Não atinge ponto de orvalho muito baixo (2°C a 3°C).

#### 4.1.7.2.1.3 Secagem por Adsorção

Quando necessitamos de ar comprimido extremamente seco, essas aplicações em específico adotam secadores por adsorção ou regenerativos.

Adicionando um material comumente conhecido como dessecante (composto por sílica gel ativada ou peneira molecular), sendo poroso e com grande poder de atração das moléculas de água faz com que a secagem seja homogênea em todo o sistema. Depois de utilizá-lo e conseguir a secagem necessária, esse material por sua vez, pode ser regenerado e reutilizado.

Podemos dizer então que um secador de adsorção tem seu trabalho em setores distintos, estando um em fase de secagem e o outro em regeneração. Sua regeneração é o principal motivo que o difere entre seus vários tipos. Alguns deles, utiliza do ar seco passando por dessecante úmido sendo assim após realizando a purga para atmosfera. Existem várias formas para essa regeneração, algumas utilizam o calor de compressão, outras empregam um sistema misto ou utilizam o ar aquecido com resistências elétricas.

Na seleção de um secador em função do ponto de orvalho, deve-se levar em consideração:

- O dimensionamento do compressor, onde a regeneração requer 0,35kW com 1,0 l/s a 7,0 bar de purga para atmosfera, em função às potências envolvidas no processo de aquecimento e circulação do ar pelo interior da torre em regeneração;
- Com o acréscimo de pressão de 1 bar temos a representação de cerca de 7,0% na potência consumida pelos compressores.

De forma natural temos um calor desenvolvido na compressão do ar, então para que tenhamos uma economia para regenerar esse material dessecante o aproveitamento desse calor é essencial, fazendo com que o ar comprimido após a saída do último estágio de compressão, passa pelo secador que está em regeneração, onde é removida a umidade de dessecante, em seguida é arrefecido e passa pelo setor de secagem.

Vantagens estão apresentadas abaixo quanto, aos secadores regenerativos.

- baixo ponto de orvalho (até  $-73^{\circ}\text{C}$ );
- nenhuma água para ser drenada.;
- em consideração ao ponto de orvalho, temos um custo de operação moderado.

As desvantagens são:

- alto custo inicial;
- na torre dessecante é necessária uma manutenção periódica;
- óleo no sistema pode prejudicar o dessecante.

#### 4.1.7.2.1.4 Secagem por Absorção

Quando se trata de secadores por absorção temos um grupo mais seletivo para sua utilização, pois seu processo de secagem é realizado através de uma reação química que resulta subprodutos agressivos, fazendo com que sua utilização seja limitada. Uma desvantagem é que o material utilizado na secagem não é passível de ser regenerado, tornando-se inviável financeiramente por sua contínua substituição.

Podendo ser chamado de deliquescente esse tipo de secador utiliza um material dessecante higroscópico tendo uma afinidade com a água. Retirando vapor de água do ar comprimido o dessecante se dissolve no líquido formado. Sendo consumido durante a operação. Sendo consumido durante a operação. Para se manter um nível adequado do dessecante, é necessário que se complete de 2 a 3 vezes por ano. O secador deliquescente não necessita de energia e não possui peças móveis.

Suas vantagens são:

- baixo custo inicial;
- não existência de peças móveis.

As desvantagens desses secadores são:

- redução limitada do ponto de orvalho. ( $-1^{\circ}\text{C}$  à  $-6,7^{\circ}\text{C}$ );
- o dessecante precisa ser substituído regularmente;
- custos de operação e manutenção caros;

- caso não exista um sistema eficiente de filtragem, o material dessecante pode passar para a tubulação de distribuição de ar. Isso pode fazer com que a tubulação sofra danos;
- para permitir que o ar úmido passe sem reagir com o dessecante anulando sua função, é necessário que matérias dessecantes derretam ou se fundam com temperaturas acima de 32°C.

Na Tabela 8, tem-se uma relação entre a quantidade de água e o valor de ponto de orvalho em diferentes aplicações industriais.

**Tabela 8.** Quantidade de água e Ponto de Orvalho em Aplicações Industriais

Tipos de equipamento ou aplicação	Conteúdo de Água	
	a) b) ponto de orvalho	mg/m <sup>3</sup>
Ferramentas e motores industriais	a) b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	5
Componentes pneumáticos não lubrificados	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Componentes pneumáticos lubrificados	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Pintura em spray	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	1
Limpeza por jateamento	a) b) P.O 10°C abaixo da menor temp. do sistema	5
Ar de instrumentação	a) b) P.O abaixo da temperatura ambiente	1
Ar de respiração	a) b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	1
Indústria alimentícia	b) P.O 10°C abaixo da temperatura ambiente	

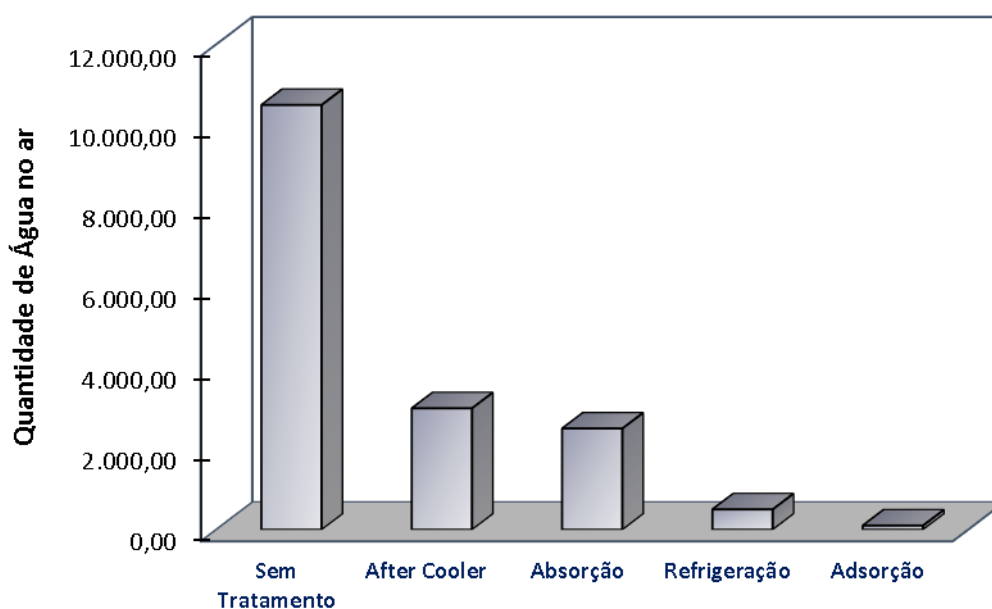
Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

#### 4.1.7.2.1.5 Comparação dos Métodos de Secagem do ar

Conforme demonstrado anteriormente, são inúmeras as vantagens trazidas em função da secagem do ar para um determinado sistema de ar comprimido, visto que independentemente do tipo de compressor, ao aspirar o ar atmosférico com o objetivo de comprimi-lo, admite também a própria umidade presente do ambiente externo. Neste

contexto, e conforme relatado nos tópicos acima, o gráfico 2 demonstra a relação de eficiência dos processos de secagem descritos previamente.

**Gráfico 2.** Comparação dos Métodos de Secagem de Ar Comprimido



Fonte: site: BlogAr - <http://mktproject.com.br/blogar/>.

#### 4.1.7.2.2 Filtragem do ar comprimido

De acordo com a norma ISO-8573, denomina-se filtro um aparato com o intuito de desagregar os contaminantes presentes em um fluido (ISO-8573/2.16).

Os filtros de ar comprimido geralmente estão presentes em três posições distintas, sendo elas: antes e depois do secador de ar comprimido, assim como em seus respectivos pontos de uso.

A designação dos filtros compreendidos antes do secador por refrigeração é distinguir o restante da contaminação de partículas sólidas e líquidas, que são aproximadamente 30%, não totalmente extinguida pelo separador de água do resfriador posterior, assegurando, os próprios trocadores de calor do secador contra os particulados em excesso, oriundos do sistema de compressão do ar, que poderiam impregná-los, causando a ineficiência em sua troca térmica.

A utilização dos filtros nas instalações tem a função de retirada das partículas sólidas presentes no ar comprimido, provenientes do ambiente externo.

Terminologia dos filtros coalescentes:

Filtros coalescentes grau AO: muito usual na retirada de partículas até 1  $\mu$ , bem como água e óleo (sendo remoção residual de no máximo 0,5mg/m<sup>3</sup> de ar a 21°C).

Filtros coalescentes grau AA: muito usual na retirada de partículas até 0,01  $\mu$ , bem como água e óleo (sendo remoção residual de no máximo 0,01mg/m<sup>3</sup> de ar a 21°C), para sua instalação deve-se preceder a instalação de um filtro do grau AO.

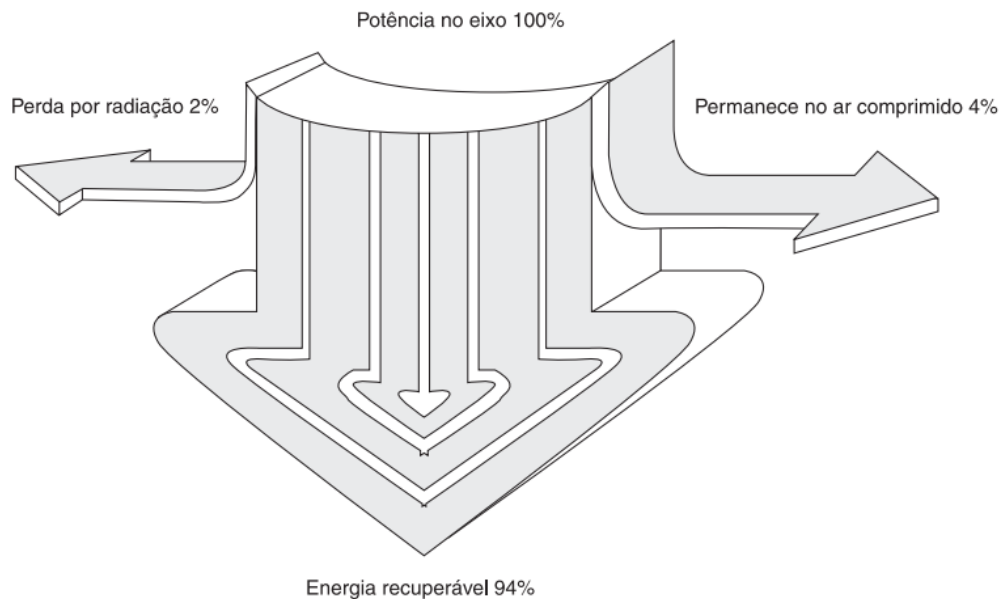
Filtros coalescentes grau ACS e AC (carvão ativo): muito usual na remoção de vapores de óleo (sendo remoção residual de no máximo 0,003mg/m<sup>3</sup> de ar (0,003 ppm) a 21°C), para sua instalação deve-se preceder a instalação de um filtro do grau AA. Não removem gases tóxicos.

#### 4.1.8 Redução de perda pela recuperação do calor de compressão

É válida a ressalva de que cerca de 84% da energia utilizada na compressão do ar comprimido é transformada em calor, e boa parte desse calor produzido é perdido no ambiente. Quando se trata de compressores com resfriadores a ar, esse calor dissipado pode estar acima de até 70% da sua energia gasta pelo motor e em compressores com refrigeração à água os valores que vão para o ambiente atingem cerca de 15% do consumo.

De acordo com a figura 33, pode-se analisar como a energia térmica gerada por um determinado compressor, no trabalho de compressão do ar, se comporta.

**Figura 33.** O calor como produto natural da compressão, energia que pode ser recuperada na forma de água quente pelo sistema de resfriamento do compressor



Fonte: Procel, 2005.

#### 4.2 SELEÇÃO DA MELHORIA NO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

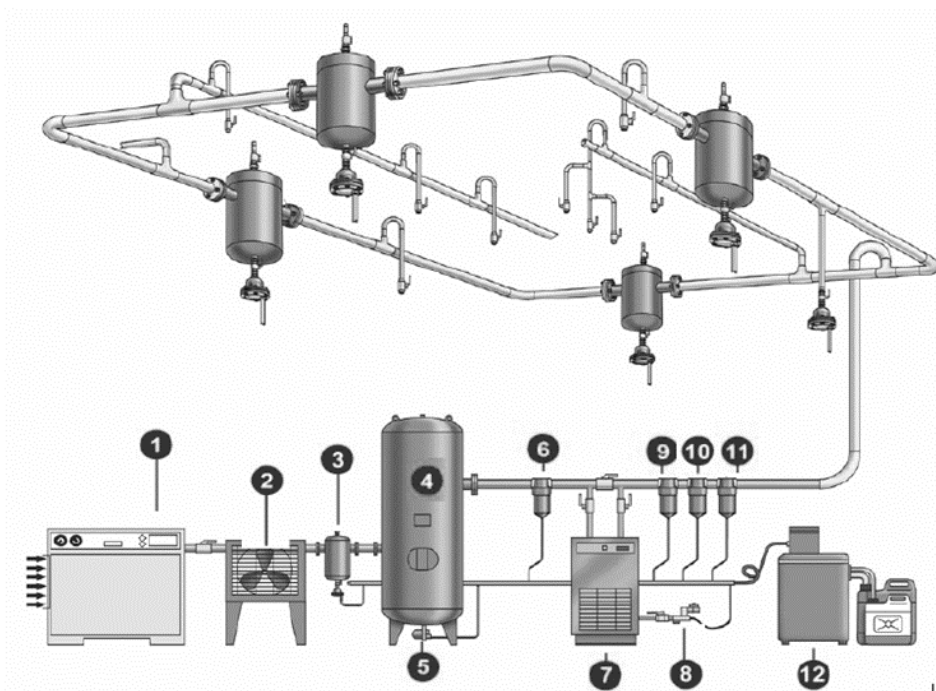
Tendo em vista os mais diversos meios de reduções de perda apresentados anteriormente, será abordado neste trabalho a tratativa para a redução dos vazamentos existentes nos mais diversos pontos da rede de ar comprimido, visto que, de acordo com a tabela 10, os custos anuais para um simples furo de 3,0 mm de diâmetro ultrapassam os R\$ 13.000,00.

É importante ter a breve noção de que é impossível eliminar todos os vazamentos presentes em um sistema, porém, deve-se reduzir ao máximo com um plano de manutenção preventiva, sendo indicado de 3 a 5 vezes ao ano, verificando os principais pontos onde as perdas possam estar ocorrendo, como juntas de vedação defeituosa, engates, válvulas e aperto das conexões, mangueiras, vedações ineficientes das uniões roscadas e principalmente a eliminação dos ramais que já se encontram fora de uso, dependendo do modo construtivo da referida rede.

### 4.3 MODELAGEM DO SISTEMA ATUAL

Um dos principais aspectos a serem levados em consideração para a melhoria de um determinado sistema, seja ele qual for, é a própria modelagem física do sistema em operação, para que seja possível realizar o levantamento dos pontos a serem implementados, a fim de se obter os resultados esperados de projeto. A figura 34 ilustra o sistema de ar comprimido hipotético para realização das ações de melhoria do conjunto.

**Figura 34.** Circuito de ar comprimido



Fonte: GSCAR, Grupo de Controle Automação e Robótica

A tabela 9 fornece o descritivo de cada número apontado na figura 34, para que se tenha uma visão mais detalhada de cada componente que compõe o circuito especificado.

**Tabela 9.** Componentes do circuito pneumático

Número	Componente
1	Compressor
2	Resfriador posterior
3	Separador de condensados
4	Reservatório
5	Purgador automático
6	Pré-filtro coalescente
7	Secador
8	Purgador automático eletrônico
9	Pré-filtro coalescente grau x
10	Pré-filtro coalescente grau y
11	Pré-filtro coalescente grau z
12	Separador de água e óleo

Fonte: GSCAR, Grupo de Controle Automação e Robótica

Tendo ciência que os vazamentos nas redes de ar comprimido representam cerca de 10 a 40% da demanda máxima, segundo Procel (2005), será adotado a pior das situações, ou seja, 40% da vazão total está sendo perdida para o ambiente externo, para que se tenha ideia da real importância deste projeto, tal como sua viabilidade econômica.

Considerando uma inspeção realizada no circuito hipotético apresentado na figura 34, cuja vazão nominal é de 80 m<sup>3</sup>/h, constatou-se que 40% da mesma está sendo perdida para o meio externo, em função dos diversos desgastes e furos existentes na rede, conforme já citado em tópicos anteriores.

#### **4.4 DEFINIÇÃO DE METAS AO SISTEMA PROPOSTO**

Neste trabalho, será estabelecida a meta hipotética de redução de 100% das perdas existentes por vazamento, para que seja realizada uma análise do retorno econômico das cabíveis ações destinadas a solucionar tais perdas.

A tabela 10 retrata o custo em relação aos vazamentos provenientes dos mais distintos diâmetros de furos existentes nas tubulações, avaliados à uma pressão de 6,0 bar, pressão usual em sistemas de ar comprimido. Levando em

consideração uma tarifa de 0,40 R\$/kWh, tem-se os respectivos custos gerados por tais vazamentos.

**Tabela 10.** Relação de custo (R\$) em função dos diâmetros dos orifícios existentes na tubulação à uma pressão de trabalho de 6,0 bar e uma tarifa de 0,40 R\$/kWh

VAZAMENTO X PERDA DE POTÊNCIA (PARA CADA FURO)							
φ do furo (mm)	Área do furo (mm <sup>2</sup> )	m <sup>3</sup> /h @ 6 bar	Potência Consumida [kW]	Custo por hora	Custo por dia	Custo Mensal	Custo Anual
1	0,7854	3,7800	0,414763	R\$ 0,17	R\$ 3,98	R\$ 119,45	R\$ 1.453,33
2	3,1416	15,1200	1,659051	R\$ 0,66	R\$ 15,93	R\$ 477,81	R\$ 5.813,31
3	7,0686	34,0200	3,73275	R\$ 1,49	R\$ 35,83	R\$ 1.075,03	R\$ 13.079,56
5	19,6350	94,5000	10,36907	R\$ 4,15	R\$ 99,54	R\$ 2.986,29	R\$ 36.333,22
8	50,2655	241,9200	26,54482	R\$ 10,62	R\$ 254,83	R\$ 7.644,91	R\$ 93.013,05
9	63,6173	306,1800	33,59579	R\$ 13,44	R\$ 322,52	R\$ 9.675,59	R\$ 117.719,65
10	78,5398	378,0000	41,47629	R\$ 16,59	R\$ 398,17	R\$ 11.945,17	R\$ 145.332,92
12	113,0973	544,3200	59,72585	R\$ 23,89	R\$ 573,37	R\$ 17.201,04	R\$ 209.279,38
14	153,9380	740,8800	81,2935	R\$ 32,52	R\$ 780,42	R\$ 23.412,53	R\$ 284.852,49
16	201,0619	967,6800	106,1793	R\$ 42,47	R\$1.019,32	R\$ 30.579,64	R\$ 372.052,23
18	254,4690	1224,7200	134,3832	R\$ 53,75	R\$1.290,08	R\$ 38.702,35	R\$ 470.878,60
20	314,1593	1512,0000	165,9051	R\$ 66,36	R\$1.592,69	R\$ 47.780,68	R\$ 581.331,61
22	380,1327	1829,5200	200,7452	R\$ 80,30	R\$1.927,15	R\$ 57.814,62	R\$ 703.411,24
25	490,8739	2362,5000	259,2268	R\$103,69	R\$2.488,58	R\$ 74.657,31	R\$ 908.330,64

Fonte: Autoria própria

Conforme análise da tabela 11 previamente demonstrada, percebe-se a tamanha importância da implementação de melhorias para o sistema, que estão diretamente conectadas ao modelo proposto para a nova rede de ar comprimido, sendo isenta de vazamentos, conforme mencionado na meta hipotética adotada para o projeto.

#### 4.5 ANÁLISE MATEMÁTICA DO SISTEMA

O consumo específico de energia é dado pela razão entre a potência de compressão pela respectiva vazão, conforme equação (18).

$$C = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}} = \frac{\text{kW}}{\frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad (18)$$

De acordo com a definição de vazão mássica “ $\dot{m}$ ”:

$$\dot{m} = \rho.A.V \quad (19)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

A = área da seção transversal por onde o fluido escoia [m<sup>2</sup>];

V = velocidade do fluido no conduto [m/s].

Tem-se que:

$$\dot{m} = \rho.\dot{Q} \quad (20)$$

Onde:

$\dot{Q}$  = vazão volumétrica do fluido [m<sup>3</sup>/h]

Obtém-se então:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (21)$$

Sabendo que a massa específica “ $\rho$ ” é o inverso do volume específico “ $v$ ”:

$$\dot{Q} = \dot{m} . v \quad (22)$$

Onde:

$v$  = volume específico do gás [m<sup>3</sup>/kg]

Vale salientar que, o consumo específico de energia “C” pode também ser expresso pela equação (23).

$$C = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}'} = \frac{\text{kW}}{\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}} = \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \quad (23)$$

Sabendo que a vazão volumétrica normalizada ( $\dot{Q}'$ ) é dada pela equação (24).

$$\dot{Q}' = \dot{m} \cdot v \quad (24)$$

A conversão de [m<sup>3</sup>/h] para [Nm<sup>3</sup>/h], é representada pela equação (25).

$$\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \left[ \frac{273}{(273+T_1)} \times \frac{P_1}{1,033} \right] \quad (25)$$

Onde:

$T_1$  = Temperatura especificada para o ar do equipamento [°C]

$P_1$  = Pressão especificada para o ar do equipamento [Pa] ou [N/m<sup>2</sup>]

De acordo com as tabelas 5, 6 e 7, desenvolve-se a tabela 11, onde a potência necessária para compressão em kW é a média das tabelas previamente citadas, assim como o consumo específico de energia, de acordo com o apresentado no item 2.7.

**Tabela 11.** Valores médios para potência de compressão, vazão de escape e consumo específico de energia

Valores avaliados para um furo de $\varnothing$ 1 mm			
Tabela	Escape do ar @ 6 bar [m <sup>3</sup> /h]	Potência necessária para compressão [kW]	Consumo Específico de Energia [kWh/m <sup>3</sup> ]
5	3,6	0,30	0,083
6	3,9	0,48	0,123
7	3,6	0,30	0,083
<b>Média</b>	<b>3,7</b>	<b>0,36</b>	<b>0,097</b>

Fonte: Autoria própria

A vazão perdida ao ambiente externo foi identificada como 40% da nominal, ou seja, 32 m<sup>3</sup>/h de ar comprimido sendo desperdiçado, pois a energia gasta para compressão do mesmo foi inútil, uma vez que não foi aproveitada em nenhuma aplicação final em função dos vazamentos presentes no sistema.

O consumo específico “C”, conforme representado na tabela 12 é:

$$C = 0,097 \frac{kWh}{m^3} \quad (26)$$

Que também pode ser escrito como:

$$C = 0,097 \frac{kW}{\frac{m^3}{h}} \quad (27)$$

Logo, o consumo em kW, “ $\dot{W}_c$ ”, para comprimir o percentual de ar que está sendo expelido da tubulação em função dos vazamentos é dado pela equação (28).

$$\dot{W}_c = C \frac{\text{kW}}{\frac{\text{m}^3}{\text{h}}} \times Q'' \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = [\text{kW}] \quad (28)$$

Onde:

C = Consumo específico de energia [kWh/m<sup>3</sup>]

Q'' = Vazão de ar perdida em função dos vazamentos [m<sup>3</sup>/h]

Para uma perda de 32 m<sup>3</sup>/h, obtém-se então o consumo "W<sub>c</sub>".

$$\dot{W}_c = 0,097 \frac{\text{kW}}{\frac{\text{m}^3}{\text{h}}} \times 32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 3,104 [\text{kW}] \quad (29)$$

Isso demonstra que a cada hora gasta-se 3,104 kW de energia para comprimir o ar que está sendo perdido do sistema. A despesa proveniente deste vazamento está representada pela tabela 12, para uma tarifa energética de 0,40 R\$/kWh.

**Tabela 12.** Despesa em função dos vazamentos na rede de ar comprimido

Potência Consumida [kW]	Custo por hora	Custo por dia	Custo Mensal	Custo Anual
3,104	R\$ 1,24	R\$ 29,80	R\$ 893,95	R\$ 10.876,42

Fonte: Autoria Própria

#### 4.6 AÇÕES A SEREM IMPLANTADAS

Através de inspeções utilizando o próprio Hh disponível dos colaboradores da empresa, pode-se elaborar um sistema de inspeção para que

sejam detectados os mais diversos locais de vazamento, com o intuito de saná-los.

Esta inspeção pode ser constituída apenas pelo método visual e audível, ou com auxílio de recursos, como equipamentos adicionais, sejam eles mais complexos como os que possibilitam a identificação de vazamentos a partir de sons não audíveis ao ser humano, quanto equipamentos mais simplórios, tal como borrifadores, que possuem uma mistura de água e sabão.

Continuando com uma situação hipotética onde os vazamentos existentes na tubulação da rede de ar comprimido possam ser identificados todos pela inspeção visual e com o auxílio de borrifadores nas partes mais críticas, como juntas, curvas de tubulações, elementos elásticos ineficientes, dentre outros, traça-se um plano periódico para que sejam realizadas tais averiguações, realizando toda a troca dos componentes que necessitam de serem substituídos e a própria manutenção da tubulação em si, como a operação de soldagem em furos existentes ao longo de sua extensão e substituição de trechos de tubulação mais críticos que não apresentam a possibilidade de reparo.

Em um sistema de ar comprimido, necessita-se de atenção para com os equipamentos, sendo que estes dependem de cuidados específicos, exigindo atenção às mudanças e tendências, objetivando sempre manter as operações eficientes e com alta disponibilidade.

Para que tais ações sejam realizadas de forma eficiente, será estabelecido programas de treinamentos para os inspetores responsáveis pela execução de tais atividades, visando destacar a importância e determinação dos mesmos com o que fora estabelecido, além de promover estratégias técnicas para solução dos possíveis problemas que poderão ser encontrados ao longo de uma inspeção usual.

#### **4.7 VERIFICAÇÃO DE EFICÁCIA**

Nesta etapa, será realizado um comparativo com os respectivos gastos anuais necessários para a execução de tais inspeções com o total economizado,

ou seja, o custo em energia elétrica que não foi consumido em virtude dos vazamentos terem sido, hipoteticamente, 100% sanados.

O custo anual total, levará em consideração o Hh dos trabalhadores deslocados para tal tarefa, visto que todos os materiais necessários para a atividade (insumos) já são existentes no estoque da empresa (almoxarifado).

Considerando o Hh dos colaboradores responsáveis pela execução do plano periódico sendo de R\$ 9,61/hora (razão entre a média de um salário do cargo mecânico de manutenção pelas horas trabalhadas), e tendo em mente a utilização de 01 colaborador durante 2 horas por semana para a correção dos problemas encontrados em toda extensão da tubulação e seus respectivos acessórios, tal como a prevenção de tais problemas após todos terem sido devidamente sanados, pode-se demonstrar a relação entre o custo anual e o montante economizado ao longo de cada ano, conforme tabela 13.

Vale observar que a previsão do custo leva em consideração um reajuste salarial de 5% ao ano e um reajuste médio da tarifa energética de 6,21%.

**Tabela 13.** Comparativo entre os gastos anuais e economia de energia elétrica ao longo de 10 anos para uma tarifa de 0,40 R\$/kWh, reajuste salarial de 5% e reajuste da tarifa médio de 6,21%.

Período	Custo Anual [Hh]	R\$ em economia de energia elétrica	Economia Total
Ano 1	R\$ 922,56	R\$ 10.876,42	R\$ 9.953,86
Ano 2	R\$ 968,69	R\$ 11.551,84	R\$ 10.583,15
Ano 3	R\$ 1.017,12	R\$ 12.269,21	R\$ 11.252,09
Ano 4	R\$ 1.067,98	R\$ 13.031,13	R\$ 11.963,15
Ano 5	R\$ 1.121,38	R\$ 13.840,36	R\$ 12.718,98
Ano 6	R\$ 1.177,45	R\$ 14.699,85	R\$ 13.522,40
Ano 7	R\$ 1.236,32	R\$ 15.612,71	R\$ 14.376,39
Ano 8	R\$ 1.298,13	R\$ 16.582,26	R\$ 15.284,12
Ano 9	R\$ 1.363,04	R\$ 17.612,02	R\$ 16.248,98
Ano 10	R\$ 1.431,19	R\$ 18.705,72	R\$ 17.274,53
<b>Σ</b>	<b>R\$ 11.603,86</b>	<b>R\$ 144.781,51</b>	<b>R\$ 133.177,65</b>

Fonte: Autoria própria.

## 5.0 CONCLUSÃO

O trabalho possui o objetivo de apontar e sanar os eventuais problemas das perdas geradoras de ineficiência de um sistema de ar comprimido, entre o início da trajetória do fluido pressurizado até suas respectivas aplicações destinadas, utilizando as cabíveis melhorias a serem tomadas para aumentar o rendimento do referido sistema.

Para que a implantação do projeto seja eficaz, necessita-se saber os pontos significantes para melhoria do sistema a ser avaliado. Este projeto visa a redução de custo em função dos vazamentos inerentes aos condutos, por onde o ar comprimido se desloca.

Como solução, ações como: constante manutenção dos equipamentos, tubulações e acessórios, e principalmente o treinamento dos operadores que não de estar diretamente ligados à execução da atividade, são imprescindíveis para melhoria do sistema, conforme previamente relatado, visto que, nas aplicações finais, encontram-se as maiores partes dos vazamentos, ou seja, a maior parte dos gastos excessivos e desperdícios.

O bom gerenciamento de um sistema é primordial para elaboração de um plano de melhoria contínua. Vale ressaltar que com a implantação dos métodos apresentados neste trabalho, teremos a possibilidade de economizar ativos em torno de dez mil reais anuais, além de elevar o rendimento do sistema e seus respectivos ganhos, por não desperdiçar energia de forma obsoleta.

## 6.0 BIBLIOGRAFIA

Atlas Copco, Distribuição de Ar, número: 15, ano: 2.002, mês: Setembro, páginas: 01 a 35.

BlogAr – O blog do ar comprimido. Disponível em: <http://mktproject.com.br/blogar/>.

Borgnakke, Claus Fundamentos da termodinâmica / Claus Borgnakke, Richard E.Sonntag; coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. – São Paulo: Blucher, 2013.

PARKER TRAINING; “Tecnologia Pneumática Industrial”; Revisão 1; Jacareí; Brasil;196 - p.; 2007.

PROCEL. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. Brasil: Manual Prático, 2005. 86 Páginas.

Rollins, John P. Manual de Ar Comprimido e Gases / Compressed Air and Gas Institute; - Editora: Pearson – tradução e revisão técnica Bruno Buck – São Paulo: Prentice Hall, 2004.