



DISCIPLINA: PROJETO DE FIM DE CURSO II – FEMEC 41100

**“ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE COMPRESSORES
ALTERNATIVOS POR COMPRESSORES ROTATIVOS TIPO
PARAFUSO”**

ESTUDANTES:

ALVARO VIEIRA CARNEIRO MENDONÇA - 11421EMC032
RAFAELLA LOPES RODRIGUES DE MELO - 11421EMC010

Uberlândia, 16 de junho de 2021

ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS POR COMPRESSORES ROTATIVOS TIPO PARAFUSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Área de concentração: Máquinas de Fluxo, Máquinas Térmicas e Sistemas Pneumáticos.

Orientadora: Profa. Dra. ANA MARTA DE SOUZA.

Uberlândia, 16 de junho de 2021

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE COMPRESSORES
ALTERNATIVOS POR COMPRESSORES ROTATIVOS TIPO
PARAFUSO**

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Orientadora Dra. ANA MARTA DE SOUZA

Prof. Dr. EDSONEI PEREIRA PARREIRA

Uberlândia, 16 de junho de 2021

MENDONÇA, A. V. C.; MELO, R. L. R. Estudo da substituição de compressores alternativos por compressores rotativos tipo parafuso. 2021, 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar as vantagens econômicas para substituição de compressores alternativos de êmbolo por compressores do tipo parafuso. O cenário da indústria mundial atual vem demonstrando uma grande procura por ar comprimido, assim a viabilidade da utilização econômica deste tipo de energia é de grande importância. O trabalho é composto pela análise geral de substituição, foram realizados estudos e encontrados os principais aspectos a serem avaliados para a troca de tais compressores. Depois disso, trabalhos anteriores foram utilizados para comprovar, com dados, as vantagens da troca dos compressores. A partir deste estudo conclui-se que os compressores do tipo parafuso apresentam uma maior viabilidade econômica e maior desempenho que o outro compressor comparado. Ademais, o projeto propõe uma análise experimental futura, para comparação dos resultados reais com a conclusão deste estudo. Este trabalho consiste em uma referência para todos que desejem fazer tal substituição.

Palavras Chave: compressores, substituição, compressores do tipo parafuso, viabilidade econômica, economia, estudo.

MENDONÇA, A. V. C.; MELO, R. L. R. Study of replacing reciprocating compressors with rotary screw compressors. 2021, 52 f. Final Project – Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

ABSTRACT

The main objective of this study is focused on the general analysis of compressors, aiming the replacement of general alternative piston compressors for the screw type compressor. The current world industry scenario has shown a great demand for compressed air, so the viability of the economic use of this type of energy is of great importance. The work comprises the general analysis of replacement, studies were carried out and the main aspects to be adopted for the replacement of such compressors were found. After that, previous works were used to prove, with data, the advantages of changing compressors. From that point, it is possible to conclude that screw type compressors have a greater economic viability and greater performance than the other compressor in comparison. Furthermore, the project intends a future experimental analysis, to compare the actual results with a conclusion of this study. This work is a reference for all who wish to make such a replacement.

Keywords: compressors, replacement, screw type compressors, economic viability, economy, study.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Custo de um sistema de ar comprimido, 1ª referência. | 9 |
| Figura 1.2 - Custo de um sistema de ar comprimido, 2ª referência | 9 |
| Figura 2.1 - Classificação de compressores com ênfase nos compressores alternativos. | 11 |
| Figura 2.2 - Cilindro de simples efeito. | 13 |
| Figura 2.3 - Cilindro de duplo efeito. | 13 |
| Figura 2.4 - Eixo virabrequim com manivelas defasadas em 180° | 14 |
| Figura 2.5 - Conjunto de acionamento | 15 |
| Figura 2.6 - (a) Diagrama P x v teórico. (b) Diagrama P x v real. | 15 |
| Figura 2.7 - Representação do espaço morto no final do curso do êmbolo em um compressor alternativo. | 16 |
| Figura 2.8 - Compressão de um gás em compressor alternativo de êmbolo. | 17 |
| Figura 2.9 - Equação eficiência volumétrica. | 19 |
| Figura 2.10 - Diagrama Pressão x Volume Teórico. | 19 |
| Figura 2.11 - Componentes compressor tipo parafuso, com elevação de rotação. | 22 |
| Figura 2.12 - Rotores Macho e Fêmea Configurações. | 24 |
| Figura 2.13 - Compressor parafuso com admissão e descarga localizadas longitudinalmente e diametralmente opostas. | 25 |
| Figura 2.14 - Compressão do fluido nos filetes dos rotores. | 26 |
| Figura 2.15 - Sequência de compressão. | 26 |
| Figura 2.16 - Aplicações de compressores em relação à vazão e pressão de descarga. | 27 |
| Figura 2.17 - Unidade compressora básica, sem instrumentação. | 28 |
| Figura 2.18 - Unidade compressora básica, sem instrumentação, representando o uso de secador genérico. | 29 |
| Figura 4.1 - Eficiência volumétrica de compressores. | 32 |
| Figura 4.2 - Diagrama de pressão versus volume idealizado para um compressor de parafuso. | 33 |
| Figura 4.3 - Espaço entre rotores, compressor parafuso. | 33 |
| Figura 4.4 - Espaços entre rotores, compressor parafuso, simulação. | 34 |
| Figura 4.5 - Capacidade de bombeamento versus custo inicial por m ³ /s. | 34 |
| Figura 4.6 - Custo de Propriedade entre compressores de êmbolo e de parafusos, nas mesmas condições de operação. | 35 |
| Figura 4.7- Comparação de gasto energético entre compressor de êmbolo e parafuso. | 37 |
| Figura 4.8 - Excesso de potência versus excesso de pressão. | 38 |
| Figura 4.9 - Demanda de ar comprimido diária para cada dia da semana. | 39 |
| Figura 4.10 - Variação de vazão ao longo do tempo. | 40 |
| Figura 4.11 - Necessidade de ar comprimido ao longo do tempo, compressor velocidade fixa x compressor velocidade variável. | 40 |
| Figura 4.12 - Redução de gastos com energia elétrica pela utilização de inversor de frequência. | 41 |
| Figura 4.13 - Partidas em compressores, comparação. | 42 |
| Figura 4.14 - Principais causas de indisponibilidade dos compressores alternativos. . | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 - Comparação limites operacionais. | 12 |
| Tabela 4.1 - Comparação êmbolo versus parafuso, manutenção. | 45 |
| Tabela 4.2 - Comparação compressor parafuso versus êmbolo, vantagens. | 45 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 8 |
| 1.2. OBJETIVO | 10 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1. CONCEITOS GERAIS | 11 |
| 2.2. COMPRESSORES ALTERNATIVOS | 12 |
| 2.2.1. CLASSIFICAÇÃO COMPRESSORES ALTERNATIVOS | 12 |
| 2.3. COMPRESSORES DE ÊMBOLO | 12 |
| 2.3.2. COMPONENTES BÁSICOS | 13 |
| 2.3.4. CICLO DE COMPRESSÃO | 15 |
| 2.4. PROCESSOS DE COMPRESSÃO DE GASES | 17 |
| 2.5. EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA | 18 |
| 2.6. COMPRESSORES ROTATIVOS TIPO PARAFUSO | 22 |
| 2.6.1. COMPONENTES BÁSICOS | 22 |
| 2.6.2. DISPOSIÇÃO DOS ROTORES E ACIONAMENTO | 23 |
| 2.6.3. FUNCIONAMENTO | 24 |
| 2.7. APLICAÇÕES DE COMPRESSORES | 27 |
| 2.8. UNIDADE COMPRESSORA | 28 |
| 3. METODOLOGIA | 30 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 4.1. ANÁLISE DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DE COMPRESSOR DE ÊMBOLO POR COMPRESSOR DO TIPO PARAFUSO | 31 |
| 4.1.1. EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA | 31 |
| 4.1.2. CUSTO DE AQUISIÇÃO | 34 |
| 4.1.3. GASTO COM ENERGIA ELÉTRICA | 36 |
| 4.1.4. UTILIZAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA | 38 |
| 4.1.5. MANUTENÇÃO | 42 |
| 4.2. VANTAGENS COMPRESSOR PARAFUSO VERSUS ÊMBOLO | 45 |
| 5. CONCLUSÕES | 47 |
| SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO | 48 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Praticamente toda instalação industrial, desde uma pequena instalação até uma grande indústria, tem algum sistema de ar comprimido, do qual são amplamente utilizados na indústria como fonte de energia para acionamento há mais de um século (ELETROBRÁS/PROCEL). O ar comprimido, ainda ocupa um lugar de destaque na indústria pesada e é essencial na movimentação das grandes máquinas da construção civil, da aviação, navegação, siderurgia, exploração mineral, escavação, prospecção mineral, entre outros (NARAHARA, 2015).

Os gastos com ar comprimido pelas indústrias são consideravelmente elevados. No cenário atual grande parte dos países vem vivendo uma crise econômica, onde se busca, cada vez mais, redução de gastos em todos os setores industriais. Para se ter uma ideia, segundo o *Office of Industrial Technologies* e *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy* (COLLINS et al., 2001), os sistemas de ar comprimido correspondem por cerca de 10% de toda eletricidade consumida nas indústrias dos Estados Unidos e 70% de todas as instalações de manufatura nos EUA tem alguma forma de sistema de ar comprimido.

Na atualidade, em torno de 6 bilhões de toneladas de ar são comprimidas por ano em todo o planeta, gerando um consumo de 500 bilhões de kWh a um custo de 30 bilhões de dólares (METALPHAN, 2017). Conforme dados do Procel, no que se refere a utilidades industriais, o ar comprimido está presente em 44% nas indústrias têxteis, para indústrias metalúrgicas em 41%, 38% para fabricação de produtos químicos e 46% no setor de fabricação de artigos de borracha e material plástico. Logo, o ar comprimido corresponde a utilidade predominante nas indústrias de alta tensão do Brasil.

As preocupações com produtividade e qualidade, em poucos anos, expandiram-se para a racionalização do consumo de energia e atingiram o estágio no qual se encontram muitas empresas, concentrados na busca persistente pelo menor custo de um sistema de ar comprimido, que apresentam equacionar as variáveis relativas à posse e controle, sejam, a aquisição, instalação e manutenção (METALPLAN, 2017). A Figura 1.1 mostra o custo de um sistema de ar comprimido num período de trabalho de aproximadamente dez anos, segundo o Manual de Ar Comprimido da Metalplan de 2017.

Figura 1.1 - Custo de um sistema de ar comprimido, 1ª referência.



Fonte: Manual de Ar Comprimido, Metalplan, 2017.

A próxima figura, por Chicago Pneumatic (2008), compara os custos de um compressor convencional trabalhando 200 dias por ano com um ciclo 65% carga, 30% alívio e 5% desligado.

Figura 1.2 - Custo de um sistema de ar comprimido, 2ª referência



Fonte: Chicago Pneumatic, 2008.

Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1849014/>>.

Observa-se os principais gastos com a utilização de um sistema de ar comprimido, no qual o maior é o gasto com energia elétrica. Assim, uma boa redução se dá com a diminuição deste quesito.

Contudo, a escolha da máquina certa para cada tipo de aplicação é de suma importância. Devem ser analisados todos os aspectos, demanda de ar comprimido com relação a vazão e pressão, gasto inicial, gasto com energia elétrica, instalação, manutenção e operação. Os tipos de compressores mais utilizados na indústria são os alternativos, os de parafuso e os centrífugos (PERRONE; AFONSO; CAVALCANTI; CAPELLA, 2001). Cada tipo de

compressor oferece uma dada capacidade de demanda de ar comprimido, levando os volumétricos em consideração, por ser o objetivo de estudo, os do tipo alternativo conseguem uma maior pressão e os rotativos, uma maior vazão.

Será analisado neste trabalho a substituição (troca) de um compressor alternativo de êmbolo por um compressor do tipo parafuso, considerando todos os aspectos apresentados até então. Segundo a Atlas Copco a utilização de compressor do tipo parafuso promove maior eficiência energética, assegura menor desgaste, reduz os custos com manutenção e uma vida útil maior dos componentes. Além de outras vantagens, como a menor quantidade de peças móveis, proporcionando menores gastos com manutenção. No entanto, o custo inicial é maior para o tipo parafuso. Assim, este trabalho compreende fazer o balanço destes gastos e promover uma base para quem pretende fazer tal substituição.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é realizar o estudo e avaliação da substituição de compressores alternativos de êmbolo por compressores alternativos rotativos do tipo parafuso. O estudo consiste na pesquisa e discussão dos aspectos mais importantes a serem analisados na troca de compressores e possíveis melhorias que podem ser realizadas para a maior viabilidade de substituição.

Os objetivos específicos desde projeto definidos para conclusão do mesmo, constituem-se em:

- elaborar a revisão bibliográfica a respeito dos conteúdos de compressores em geral, compressor alternativos de êmbolo, compressores do tipo parafuso, processo de compressão de gases, eficiência volumétrica, aplicação de compressores e unidade de compressão;
- aspectos principais para análise de substituição de compressores;
- discussão dos aspectos para comprovar a viabilidade de substituição.

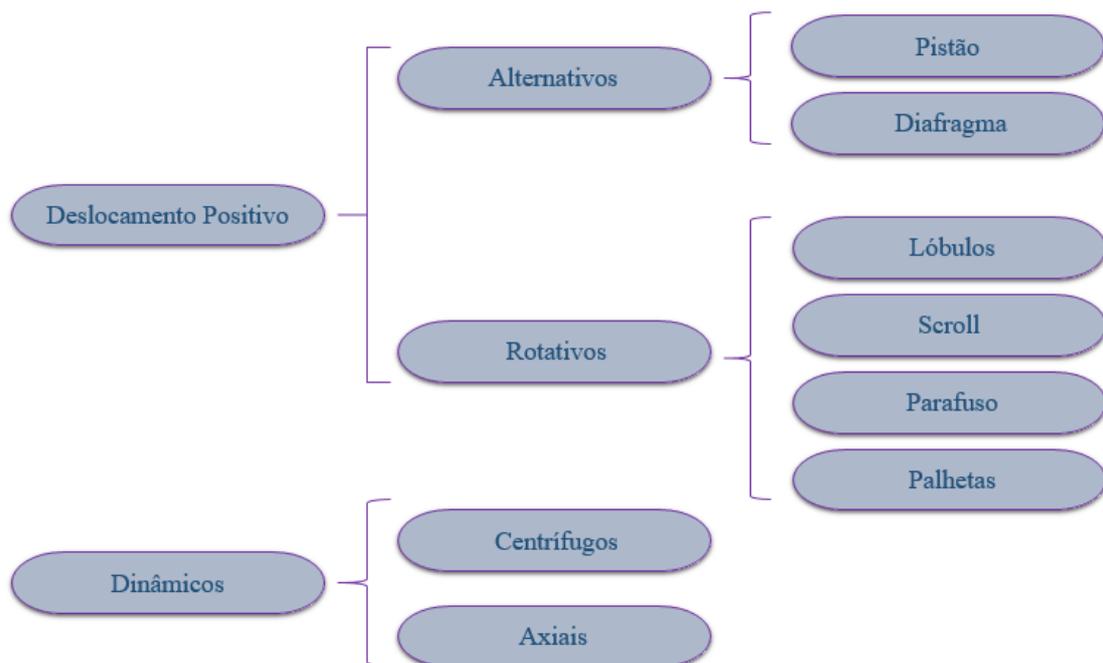
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCEITOS GERAIS

Compressores são máquinas nas quais comprimem fluidos gasosos elevando sua temperatura e pressão. Existem atualmente no mercado variações em princípio de funcionamento, deslocamento positivo e dinâmicos, dentre os quais são divididos em outras classes, como no fluxograma a seguir. Os compressores alternativos são compressores de deslocamento positivo, assim seu princípio de funcionamento é dado pela compressão por redução de volume do fluido enquanto os compressores dinâmicos transformam a energia cinética de rotação em energia de pressão do fluido.

Os compressores volumétricos são divididos em hermético, semi-hermético e abertos. Nos compressores herméticos o motor elétrico, seus componentes e toda a parte de lubrificação e resfriamento estão fechados, vedados, unidos por solda, e os semi-herméticos são aparafusados e podem ser abertos facilmente. Sendo assim, os compressores abertos têm uma maior facilidade, comparado com os outros tipos de compressores, de se fazer a manutenção do equipamento.

Figura 2.1 - Classificação de compressores com ênfase nos compressores alternativos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1.1 - Comparação limites operacionais.

| | Tipo | Máx. Vazão medida na sucção [CFM] | Máx. Pressão descarga [psia] |
|--------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Volumétricos | Alternativos | 3 500 - 5 000 | 35 000 - 50 000 |
| | Rotativos | 50 000 | 100 - 250 |
| Dinâmicos | Centrifugo | 200 000 | 3 000 - 6 000 |
| | Axiais | 2 000 000 | 80 - 130 |

Fonte: Nóbrega, 2011. Adaptada.

Na tabela acima é possível observar e comparar os limites operacionais de compressores. Os compressores volumétricos têm menor vazão e alcançam maiores pressões, já os compressores dinâmicos tem maior vazão e por outro lado alcançam menores pressões. É importante destacar que os compressores alternativos de êmbolo podem alcançar diferentes razões de compressão, ficando em aberto a máxima pressão de descarga, pois podem ser utilizados um número de estágios (cilindros dispostos em série), a depender da demanda.

2.2. COMPRESSORES ALTERNATIVOS

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO COMPRESSORES ALTERNATIVOS

Os compressores alternativos são classificados em compressores de deslocamento positivo ou também chamado de volumétricos. São máquinas de fluxo, que comprimem o fluido em fase gasosa, elevando a pressão do mesmo.

2.3. COMPRESSORES DE ÊMBOLO

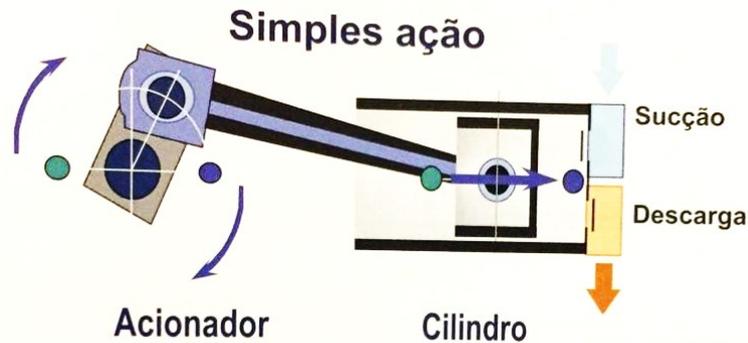
O compressor de êmbolo é um dos mais antigos modelos de compressores. Essa máquina é composta por um êmbolo que desloca no interior de um cilindro, comprimindo o gás.

2.3.1. COMPRESSORES DE SIMPLES E DUPLO EFEITO

São classificados quanto ao efeito. É chamado de simples efeito quando existe uma única câmara de compressão, e de duplo efeito quando há duas câmaras de compressão. O chamado de duplo efeito, por ter duas câmaras de compressão, uma de cada lado do êmbolo, estas funcionam paralelamente,

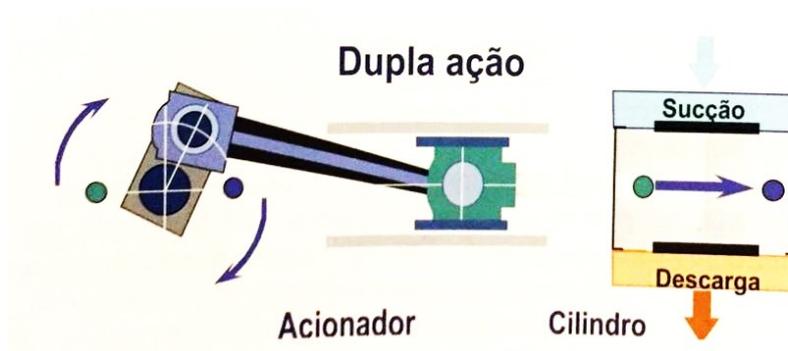
enquanto uma está a succionar, a outra comprime (NÓBREGA, 2011). O modelo mais usado para equipamentos de menor porte é o compressor de simples efeito. O compressor de duplo efeito tem a desvantagem de precisar de um maior cuidado em relação à sua vedação. É necessário utilizar a selagem da haste ou engaxetamento*, devido as compressões ocorrerem de ambos os lados (NÓBREGA, 2011). Pode-se observar nas figuras a seguir esquema de funcionamento, simples e duplo efeito.

Figura 2.2 - Cilindro de simples efeito.



Fonte: (NÓBREGA, 2011).

Figura 2.3 - Cilindro de duplo efeito.



Fonte: (NÓBREGA, 2011).

*Engaxetamento, relativo à gaxeta, junta de separação entre duas peças montadas uma na outra.

2.3.2. COMPONENTES BÁSICOS

A parte estrutural da máquina é composta pelos seguintes componentes: cárter (ou carcaça de óleo), mancais, bielas, cruzeta, volante, eixo virabrequim, entre outros (NOBREGA, 2011). Esses componentes são responsáveis pela conversão do movimento rotativo do eixo, que aciona a máquina, pelo movimento alternativo da haste (NOBREGA, 2011). Os componentes

responsáveis pela compressão são: haste, êmbolo, selagem, válvulas (de sucção e descarga), anéis de compressão e cilindro.

2.3.3. CONJUNTO DE ACIONAMENTO

➤ Cárter

O cárter ou bloco do compressor, sua função principal é proteger do meio externo as partes móveis do compressor (eixo virabrequim, mancais, bielas, etc.), além disso é o local no qual é depositado o óleo lubrificante.

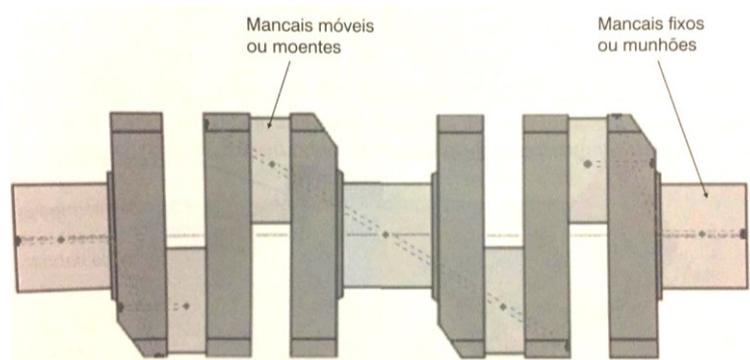
➤ Biela

A biela é responsável por transmitir o movimento rotacional do eixo para o cilindro de compressão e vice-versa, transmitindo a força recebida pelo eixo ao cilindro.

➤ Eixo Virabrequim

No eixo virabrequim (também chamado de eixo excêntrico ou eixo de manivelas) são montadas as bielas, em seções defasadas (manivelas). O eixo tem sua configuração mostrada na figura a seguir.

Figura 2.4 - Eixo virabrequim com manivelas defasadas em 180°

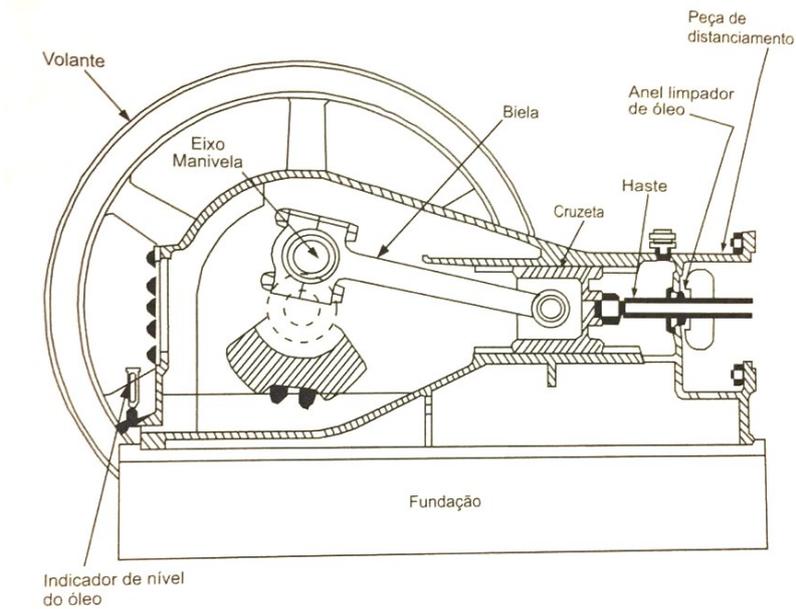


Fonte: (SILVA, 2009).

➤ Volante

Responsável por conectar o eixo do compressor ao motor, por uma correia.

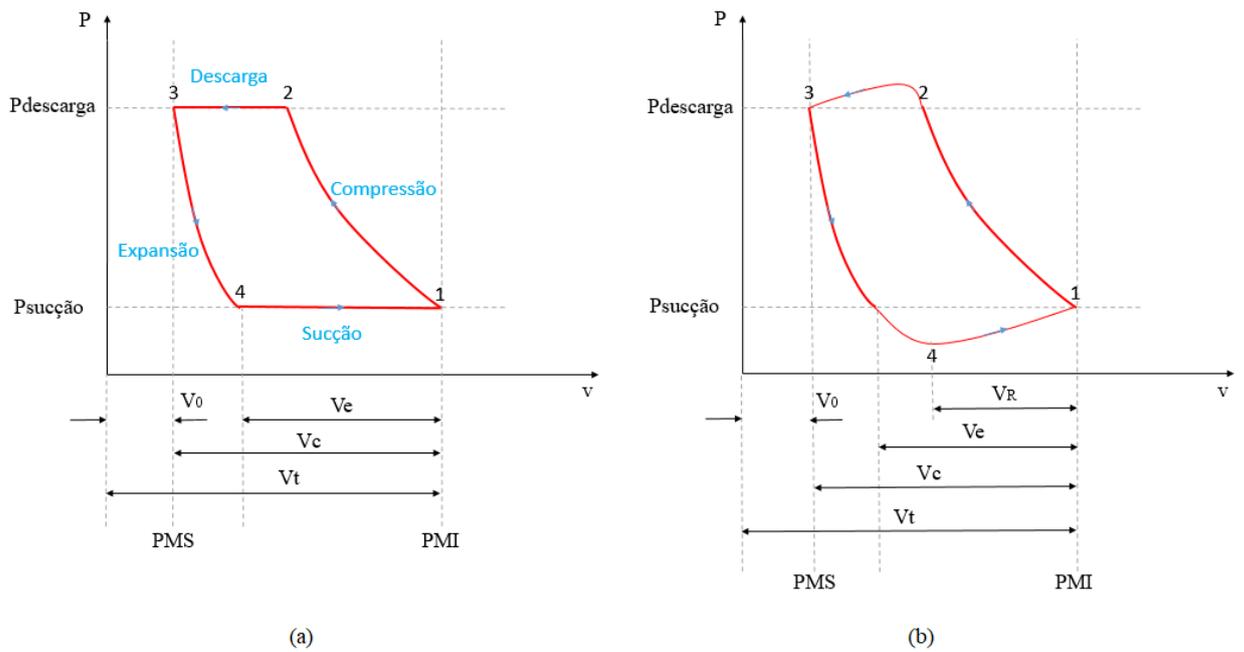
Figura 2.5 - Conjunto de acionamento



Fonte: (NÓBREGA, 2011).

2.3.4. CICLO DE COMPRESSÃO

Figura 2.6 - (a) Diagrama P x v teórico. (b) Diagrama P x v real.



Fonte: Elaborado pelos autores.

V_0 = Volume morto;
 V_C = Cilindrada;
 V_t = Volume total;

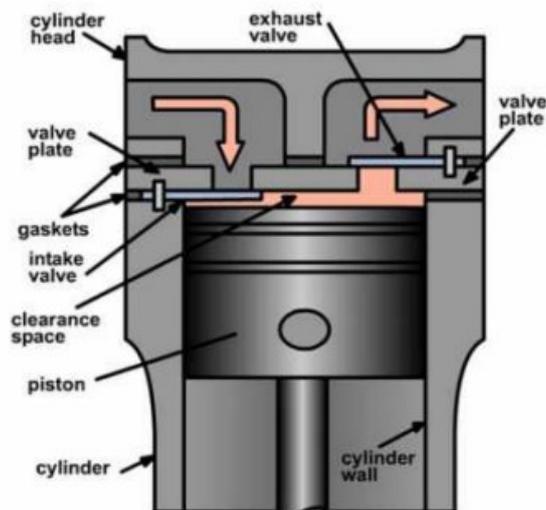
V_e = Volume efetivo;

V_R = Volume Real.

A compressão do fluido, vapor ou fluidos refrigerantes em geral, é feita através do movimento de um êmbolo, realizado por trabalho mecânico ou elétrico, do ponto morto inferior (PMI) ao ponto morto superior (PMS). A sucção é feita através da diferença de pressão entre o fluido dentro e a montante do cilindro, ela também pode ser feita por sucção forçada, onde algum equipamento promove a energização do fluido para dentro do cilindro, como acontece em turbocompressores. O diagrama teórico não permite que as válvulas se abram, pois, as mesmas precisam da diferença de pressão para abrir e fechar.

Na etapa de compressão as válvulas de sucção e descarga estão completamente fechadas, assim a compressão acontece até que se atinja a força necessária para vencer a força da mola da válvula de descarga e o vapor ser liberado. Nesse processo o fluido não é totalmente liberado, restando um volume no interior do cilindro, isso acontece devido ao volume morto, que é necessário para abertura e fechamento das válvulas. Esse volume morto entra no processo de expansão quando a biela move do PMS ao PMI (ponto 3 ao 4), estando as válvulas de sucção e descarga fechadas.

Figura 2.7 - Representação do espaço morto no final do curso do êmbolo em um compressor alternativo.



Fonte: disponível em

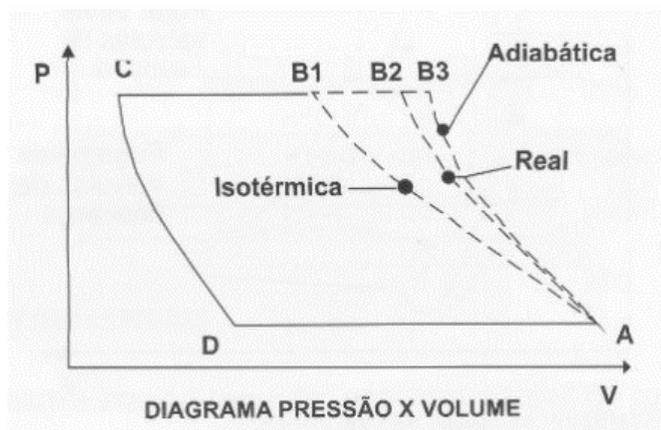
http://www.professor.unisinos.br/mhmac/Refrigeracao/CAP5_REF_2015_v1.pdf.

2.4. PROCESSOS DE COMPRESSÃO DE GASES

Será apresentado neste tópico a respeito de processos de compressão de gases, para melhor compreensão da eficiência volumétrica de compressores no tópico seguinte. A explicação será dada utilizando princípios de funcionamento de compressores alternativos.

A compressão real de um gás ocorre entre uma compressão isotérmica e a adiabática (TOUZA, 2015). Essa compressão real é chamada de politrópica. Abaixo está representado o diagrama pressão *versus* volume, observa-se as isotermas.

Figura 2.8 - Compressão de um gás em compressor alternativo de êmbolo.



Fonte: Nóbrega, 2011.

Analisando o gráfico, a compressão isotérmica seria o ideal para o funcionamento de um compressor, mas na prática não é o que ocorre. Isso se deve ao fato de que na compressão isotérmica, como o nome diz, a temperatura inicial, de sucção, do gás seria exatamente igual a temperatura final, de descarga. Assim todo calor entregue durante a compressão tem de ser retirado na forma de calor. Precisaria de um resfriamento demasiado eficiente, em que o gás permanecesse em temperatura constante durante o processo. Contudo, o trabalho do acionador seria menor, conseqüentemente uma potência menor.

Na compressão adiabática a energia térmica não é trocada com o meio, o sistema é isolado. Só seria possível se não tivesse troca de calor entre as paredes e componentes e também sem nenhum sistema de resfriamento. O gás sairia com uma temperatura extremamente elevada na descarga, o que causaria problemas em componentes e grandes riscos de explosão do óleo lubrificantes, pois poderia alcançar a temperatura de ignição do óleo. Além de gastos energéticos excessivos. Observa-se a área (representa o trabalho gasto) do gráfico acima, em que é maior para o caso da compressão adiabática.

A compressão real ou politrópica irá depender do sistema de resfriamento, levando em consideração o risco de superaquecimento e quanto mais eficiente mais próxima da isotérmica, para a melhor redução de gasto energético.

A equação de Clapeyron ou lei dos gases ideais, está expressa a seguir.

$$P V = n R T \quad 2.1$$

Fazendo para caso do processo isotérmico, considerando o mesmo gás, onde n é o número de mols do gás e R a constante dos gases perfeitos e a temperatura é constante, a equação para o processo isotérmico é representada a seguir.

$$P V = \text{Contante} = P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots \quad 2.2$$

Um processo politrópico, de um gás ideal, pode ser expresso pela seguinte equação, em que n corresponde ao coeficiente politrópico.

$$P V^n = \text{Contante} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n = \dots \quad 2.3$$

Para o processo processos adiabáticos, o coeficiente politrópico (n) se iguala ao coeficiente de expansão adiabática (k) que corresponde à relação entre os calores específicos (C_p/C_v) a pressão constante e a volume constante do ar.

$$P V^k = \text{Contante} = P_1 V_1^k = P_2 V_2^k = \dots \quad 2.4$$

2.5. EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA

Pode-se definir a eficiência de um compressor alternativo, ou seu rendimento volumétrico, como a sua capacidade dividida pela quantidade de energia consumida por ele. Com base no ciclo teórico já apresentado durante o trabalho, observa-se que o volume admitido (V_e) não é equivalente ao volume deslocado pelo êmbolo (V_c). Introduce-se então a eficiência volumétrica teórica.

$$\eta_{VT} = \frac{V_e}{V_c} \quad 2.5$$

Essa expressão a cima é apenas teórica pois não são consideradas as perdas. A eficiência volumétrica real leva em conta as perdas de carga nas válvulas de admissão, as perdas devido ao aquecimento do gás e as fugas.

Segundo a USP, a eficiência, ou rendimento volumétrico de um compressor, é representada pela sua capacidade de carga sobre a energia consumida por ele, portanto, pensando de forma ideal, é a razão entre o volume do fluido que entra na câmara de compressão e a mudança volumétrica que ocorre nesta câmara.

Figura 2.9 - Equação eficiência volumétrica.

$$\eta = 100 - \varepsilon \left[\frac{P_{\text{descarga}}}{P_{\text{aspiração}}} \right]^{\frac{1}{n}} - 1$$

ε = Porcentagem de volume perdido;

n = expoente isoentrópico;

$n = 1$ p/ expansão isotérmica;

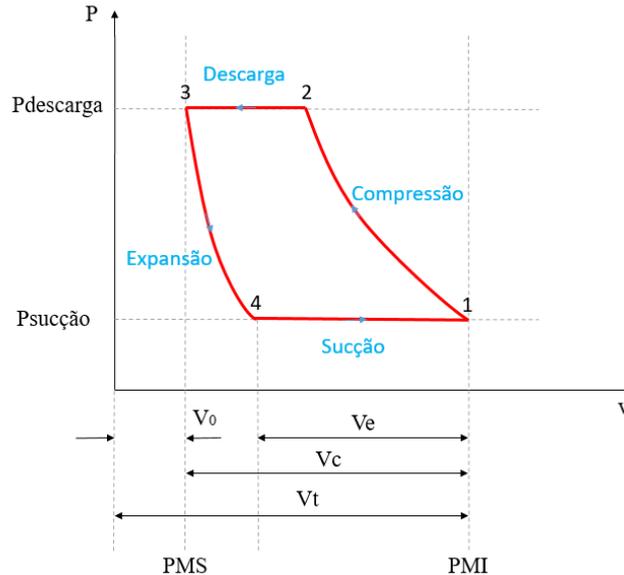
$n = k = C_p/C_v$ p/ expansão adiabática;

Fonte: Notas de aula Profa. Alessandra Lopes de Oliveira FZEA/USP. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4457439/mod_resource/content/1/Aula5compressor2018.pdf>.

Para encontrar a equação acima, os passos a seguir são seguidos. E considerando o diagrama Pressão versus Volume teórico, Figura 2.10, para melhor visualização dos volumes.

Figura 2.10 - Diagrama Pressão x Volume Teórico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

De processo politrópico, como citado no tópico 2.4 a equação 2.3 (apresentada novamente como equação 2.6 abaixo), tem-se para a compressão:

$$P V^n = \text{Contante} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \quad 2.6$$

Sendo, 1, 2, 3 e 4 os pontos no diagrama. P a pressão, V o volume e n o coeficiente politrópico.

Na sucção, $P_1 = P_4 = P_s$.

E para a descarga, $P_2 = P_3 = P_d$.

Sendo P_s a pressão de sucção e P_d a pressão de descarga.

Para a expansão tem-se.

$$P_3 V_3^n = P_4 V_4^n \quad 2.7$$

Pelo diagrama,

$$V_4 = V_C + V_0 - V_e \quad 2.8$$

Relembrando,

V_0 = Volume morto;

V_C = Cilindrada;

V_t = Volume total;

V_e = Volume efetivo;

V_R = Volume Real.

Inserindo $V_3 = V_0$ (pelo diagrama Figura 2.10) e a equação 2.8 em equação 2.7, tem-se.

$$P_3 V_0^n = P_4 (V_C + V_0 - V_e)^n \quad (\div V_C^n)$$

$$P_3 \frac{V_0^n}{V_C^n} = \frac{P_4}{V_C^n} (V_C + V_0 - V_e)^n$$

Elevando os dois lados a 1/n.

$$\sqrt[n]{P_3 \frac{V_0^n}{V_C^n}} = \sqrt[n]{\frac{P_4}{V_C^n} (V_C + V_0 - V_e)^n}$$

$$\sqrt[n]{P_3} \frac{V_0}{V_C} = \sqrt[n]{P_4} \frac{1}{V_C} (V_C + V_0 - V_e)^n$$

Reorganizando.

Sendo m a relação de espaço morto,

$$\frac{V_0}{V_C} = m \quad 2.9$$

Substituindo este e pela equação 2.5, tem-se.

$$\sqrt[n]{\frac{P_3}{P_4}} m = \frac{(V_C + V_0 - V_e)^n}{V_C} = 1 + m - \eta_{VT}$$

Reorganizando e fazendo as devidas substituições.

$$\eta_{VT} = 1 + m \left[- \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} + 1 \right] \quad 2.10$$

Assim a equação acima se iguala a equação da FZEA/USP. Onde m é a porcentagem de volume perdido (ϵ , na Figura 2.9). Ou seja, o volume morto está presente na eficiência volumétrica, quando maior for, menor a eficiência volumétrica de um dado compressor.

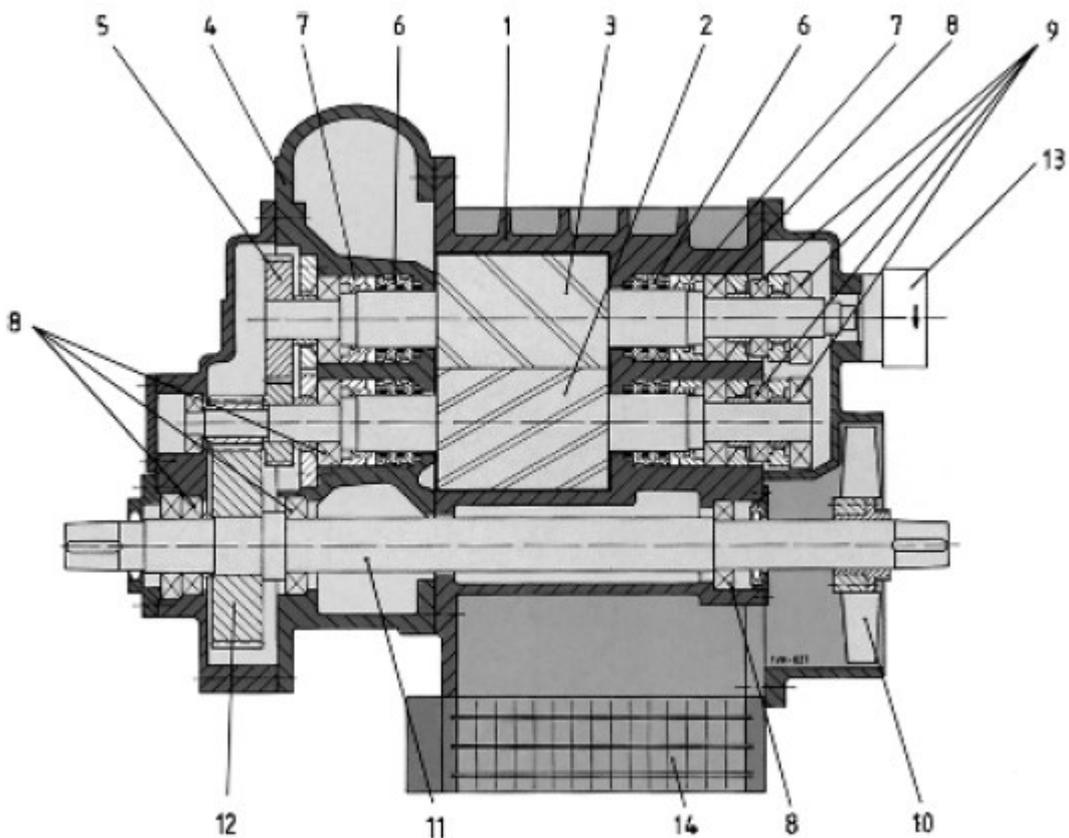
2.6. COMPRESSORES ROTATIVOS TIPO PARAFUSO

Os compressores do tipo parafuso são máquinas cujo princípio de funcionamento é o mesmo dos compressores de êmbolo, de deslocamento positivo. No entanto, consiste de dois rotores que rotacionam em movimento sincronizado e em sentidos contrários, engrenados um ao outro. O aumento da pressão, nesse tipo de máquina, é dado pela redução do volume do fluido entre os lóbulos dos rotores. Essa redução é feita axialmente da sucção para a descarga.

2.6.1. COMPONENTES BÁSICOS

Como introdução para a compreensão do funcionamento desta máquina de fluxo, será apresentado alguns componentes de um compressor rotativo tipo parafuso.

Figura 2.11 - Componentes compressor tipo parafuso, com elevação de rotação.



Fonte: *A Practical Guide to Compressor Technology*, Bloch, Heinz P.- 2ª edição, 2006.

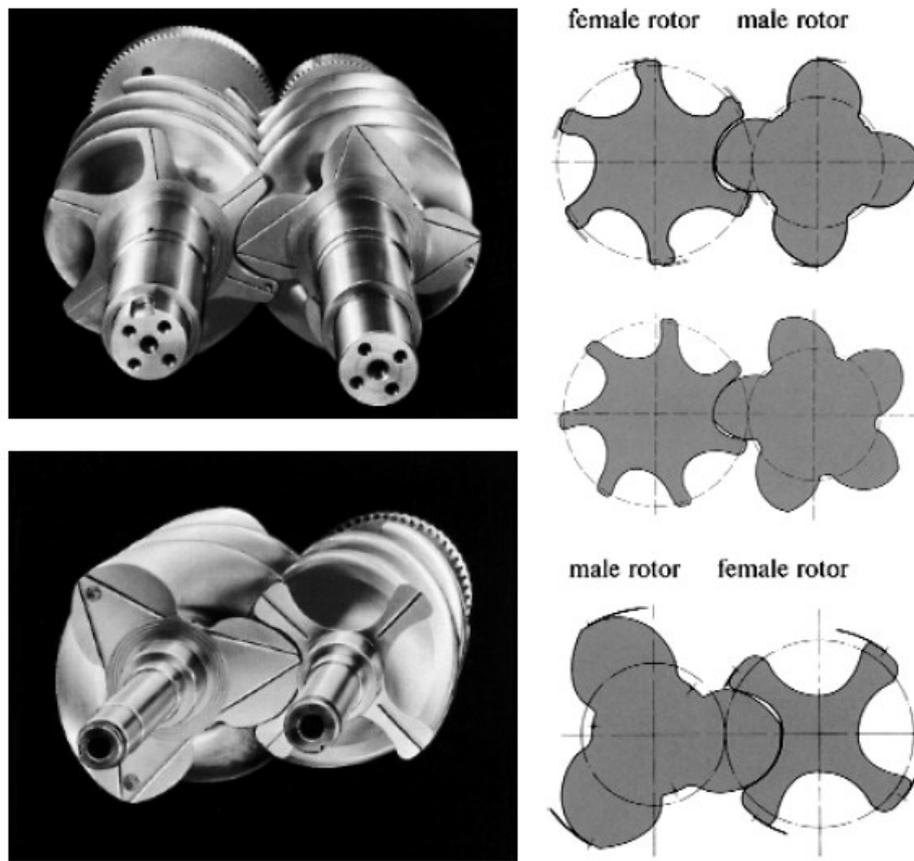
- 1 - Carcaça
- 2 - Rotor Macho
- 3 - Rotor Fêmea

- 4 - Placa lateral de entrada
- 5 - Engrenagens de sincronização
- 6 - Vedação de eixo de anel de carbono
- 7 - Vedação de óleo
- 8 - Rolamento radial
- 9 - Rolamento axial
- 10 - Arrefecimento, *Ventilation fan*
- 11 - Eixo de rotação, responsável pelo acionamento
- 12 - Engrenagem de conexão entre eixos e “elevação de rotação”
- 13 - Bomba de óleo
- 14 - “Resfriador de óleo”

2.6.2. DISPOSIÇÃO DOS ROTORES E ACIONAMENTO

Os dois rotores responsáveis pela compressão do fluido têm formato de parafuso, são chamados de rotor macho e rotor fêmea, e são respectivamente de perfil convexo e perfil côncavo. Os rotores são usinados em forma helicoidal e podem ser vistos na imagem a seguir. Os projetos em sua maioria possuem a configuração 4+6, em que o rotor macho tem 4 lóbulos e o fêmea 6 lóbulos (SILVA, 2009). Existindo outras configurações, como podem ser vistas na figura a seguir. A que apresenta uma tecnologia mais recente é a configuração 5+7 (SILVA, 2009).

Figura 2.12 - Rotores Macho e Fêmea Configurações.



Fonte: *A Practical Guide to Compressor Technology*, Bloch, Heinz P.- 2ª edição, 2006.

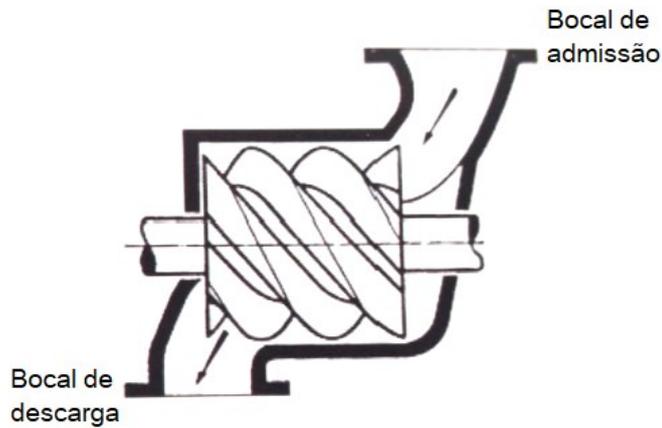
O acionamento pode ser dado por motores elétricos ou por motores de combustão interna. A dois tipos de acoplamento dos rotores. O primeiro tipo é o qual o rotor motriz, chamado assim pois este é utilizado para o acionamento, sendo este normalmente o fêmea, conduz o outro rotor através do contato direto entre os lóbulos, esses são chamados de rotores não sincronizados. O outro, chamado de sincronizados, é dado por engrenagens, deste modo sem nenhum contato entre os lóbulos (SILVA, 2009). O acionamento pode ser dado diretamente ou utilizando um eixo de rotação anterior ao eixo do parafuso motriz, em caso de elevação de rotação ou até mesmo de uma provável redução (não muito empregada).

2.6.3. FUNCIONAMENTO

A sucção do fluido em estado gasoso é dada pela redução de pressão no bocal de entrada, devido a rotação dos rotores. Os espaços entre os lóbulos abrem-se e aumentam de volume, assim o gás succionado preenche os espaços entre os lóbulos. Com esse movimento de rotação os espaços entre os lóbulos começam a diminuir até seu valor mínimo, comprimindo o gás e na extremidade

oposta à admissão, defasada de 180° , acontece a saída do gás a elevada pressão para a descarga (SILVA, 2009).

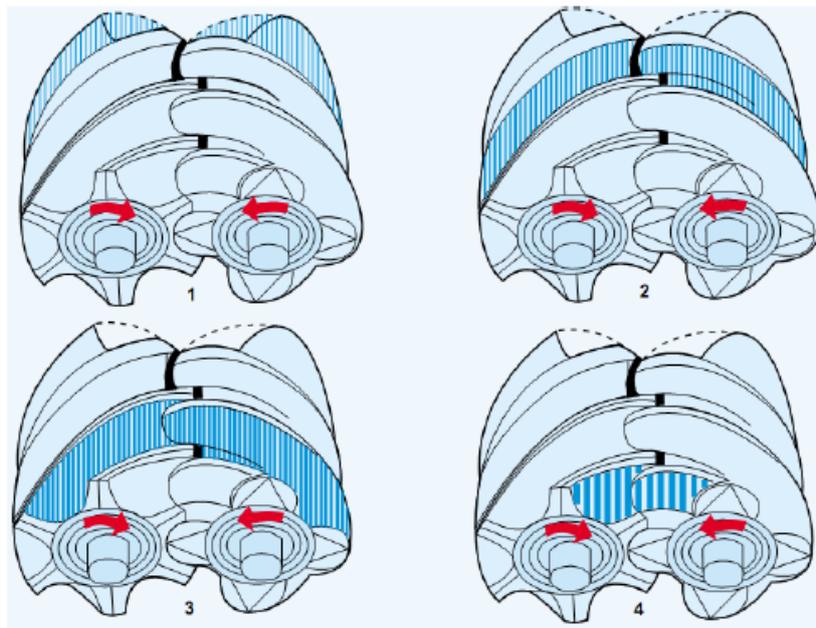
Figura 2.13 - Compressor parafuso com admissão e descarga localizadas longitudinalmente e diametralmente opostas.



Fonte: Silva, 2009. Adaptada.

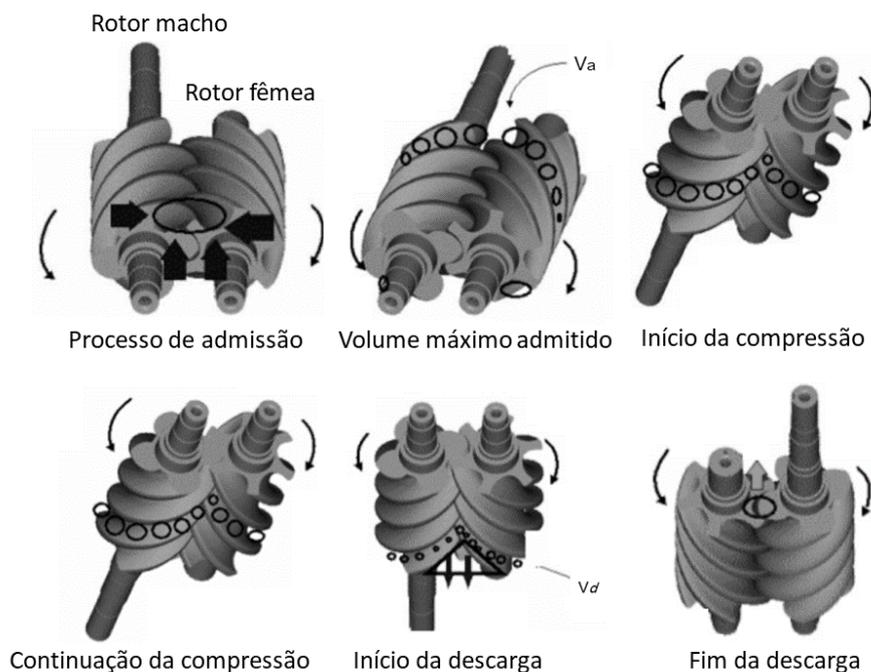
O volume geométrico admitido V_a , é equivalente ao volume do filete que é formado pelo espaço entre os lóbulos e a carcaça da câmara de compressão, multiplicados pelo número de lóbulos do rotor fêmea (SILVA, 2009). Como os compressores tipo parafuso não possuem válvulas que determinam quando será dada a descarga, a localização do bocal de descarga é de suma importância, pois é essa localização que determina a mesma. O volume de descarga V_d é o volume localizado nos espaços entre os lóbulos na descarga.

Figura 2.14 - Compressão do fluido nos filetes dos rotores.



Fonte: Manual do Ar Comprimido - Atlas Copco, 2010. Disponível em: Desempenho Comparativo entre Compressores Rotativos de Parafuso com Velocidade Fixa e Variável, Tessaro, S. A. e Michels, A. - 2014

Figura 2.15 - Sequência de compressão.



Fonte: (SILVA, 2009).

Nas figuras anteriores nota-se a redução do espaço entre os lóbulos. A cada passo esse espaço diminui progressivamente.

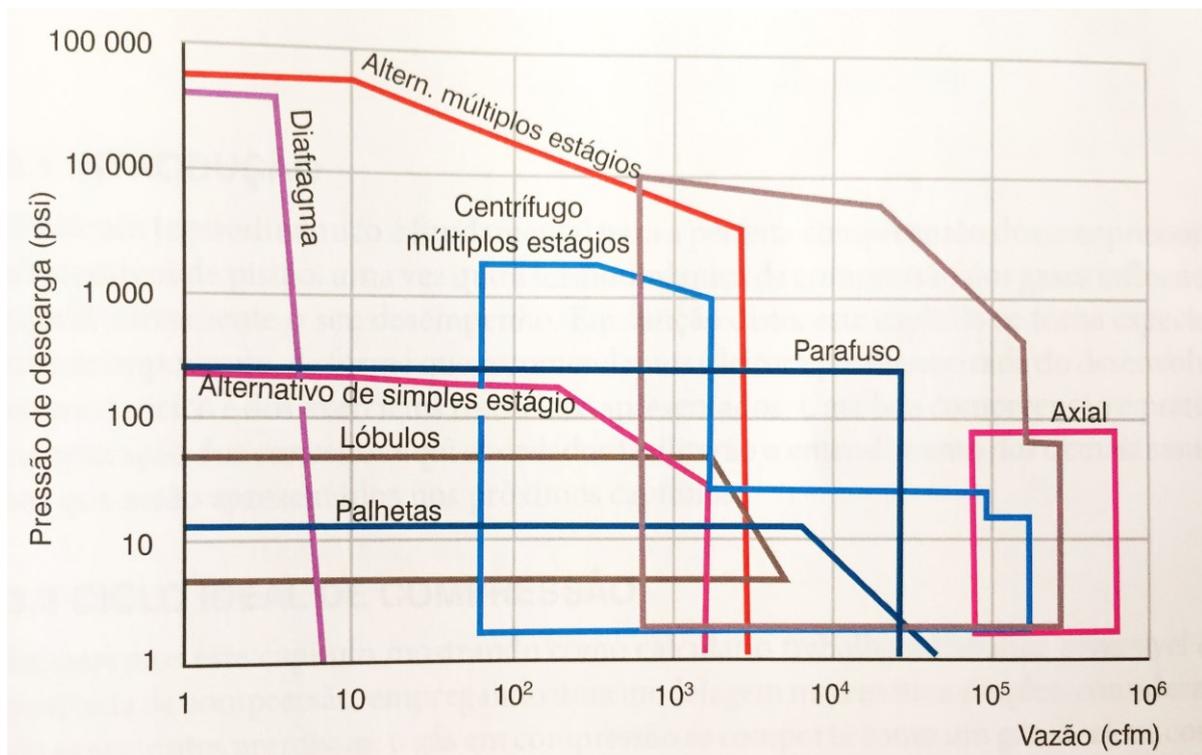
2.7. APLICAÇÕES DE COMPRESSORES

Os compressores alternativos têm suas vantagens em relação a alguns tipos de compressores. São robustos, de pequenos tamanhos (dependendo da aplicação) e leves. Pode-se observar na figura a seguir as aplicações de compressores em geral com relação à sua capacidade de vazão e pressão de descarga. Assim, os compressores alternativos (de simples estágio) conseguem elevar a pressão a valores nos quais permitem a aplicação do mesmo em diversos campos. Os compressores de êmbolo de dois estágios são empregados em aplicações maiores, por exemplo para serviços contínuos (ROLLINS, 2004).

Como pode ser visto também na figura, os compressores rotativos tipo parafuso, conseguem atingir uma maior vazão dentre os compressores alternativos. Esses, como os outros alternativos são amplamente utilizados em aplicações industriais.

Na indústria, os compressores alternativos são utilizados em aplicações pneumáticas, sistemas de comando e controle, automatização de processos, dentre outras inúmeras aplicações. São amplamente utilizados em hospitais, postos de combustíveis, aeroportos, em centrais de refrigeração e em construção civil.

Figura 2.16 - Aplicações de compressores em relação à vazão e pressão de descarga.

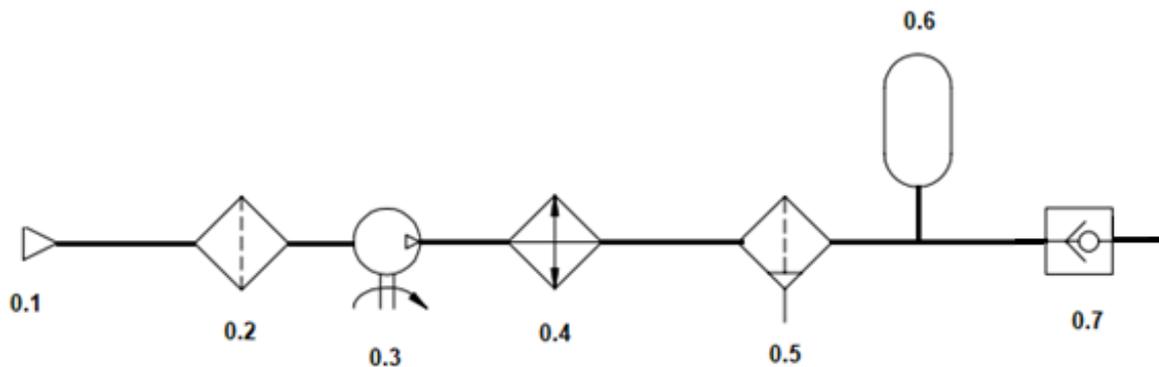


Fonte: Nóbrega, 2011.

2.8. UNIDADE COMPRESSORA

Uma unidade compressora é um conjunto de equipamentos que tem por fim elevar a pressão de um fluido gasoso, no qual utiliza-se de pelo menos um compressor. Esse conjunto de equipamentos é basicamente os listados a seguir, filtro de ar, compressor, intercooler, dreno e reservatório ou cilindro.

Figura 2.17 - Unidade compressora básica, sem instrumentação.



Fonte: Elaborado pelos autores, baseado na norma ISO 1219-1.

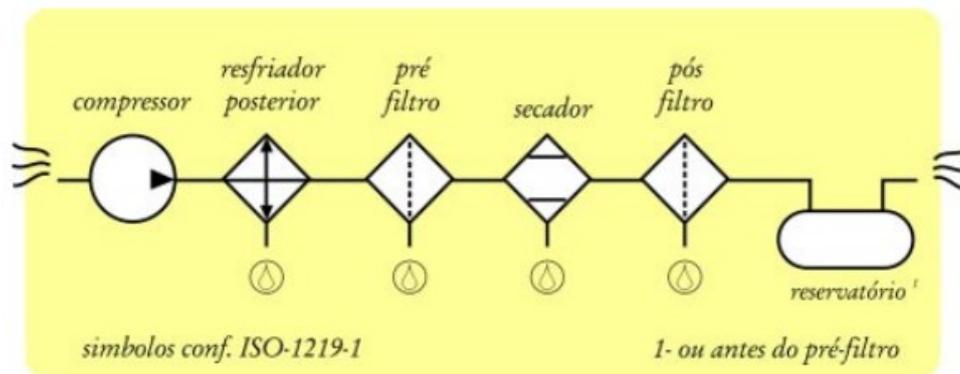
Descrição dos componentes da Figura 2.17:

- 0.1 - Fonte de energia pneumática, indica o sentido e a natureza do fluido;
- 0.2 - Filtro genérico;
- 0.3 - Compressor de ar, com um sentido de escoamento, deslocamento fixo e um sentido de rotação;
- 0.4 - Resfriador (trocador de calor, intercooler), sem indicação das linhas de escoamento do fluido refrigerante;
- 0.5 - Filtro com separador, dreno manual;
- 0.6 - Reservatório, sem natureza de carga definida;
- 0.7 - Retenção, sentido único de escoamento.

Essa linha de compressão é genérica para o entendimento de como funciona e como são alocados esses equipamentos. Lembrando que cada caso difere, depende da demanda de ar comprimido e sua aplicação e também do tipo de compressor utilização. Na figura acima não está demonstrada a continuação da linha, para cada tipo de aplicação são necessários sensores, equipamentos de segurança, válvulas, entre outros que também dependem da aplicação e demanda.

Além desses equipamentos, é desejável a utilização de secadores de ar comprimido para uma maior qualidade do mesmo, pois podem ser encontrados três contaminantes típicos: água, óleo e partículas sólidas. Para o fornecimento confiável de ar comprimido de qualidade a norma internacional ISO-8573-1 é a referência central sobre qualidade de ar comprimido para uso geral, não valendo para uso muito particular, como ar medicinal, respiração humana e alguns outros (Manual de Ar Comprimido – Zenit, 2006). A seguir está exposta a sequência padrão de equipamentos que a ISO-8573-1 recomenda.

Figura 2.18 - Unidade compressora básica, sem instrumentação, representando o uso de secador genérico.



Fonte: Manual de Ar Comprimido, Zenit, 2006.

3. METODOLOGIA

Durante a construção deste trabalho, a partir da revisão bibliográfica, foi possível encontrar parâmetros que levaram a discussão das vantagens de um compressor sobre o outro. Além disso foi realizada pesquisa para encontrar quais parâmetros devem ser analisados para fazer a substituição de compressores. Segundo o Manual de Ar Comprimido da Metalphan, as variáveis mais dispendiosas são aquisição, instalação, manutenção e gastos com energia elétrica. Foram então estudadas essas tais variáveis para a análise de viabilidade da substituição.

Com relação à revisão bibliográfica a eficiência volumétrica dos compressores do tipo parafuso foi levantada em questão, pelo motivo de não haver espaço morto em sua constituição e funcionamento. O próximo tópico irá discutir sobre as vantagens do compressor de parafuso sobre os alternativos de êmbolo, também com relação ao funcionamento. Levando em consideração vibração, ruído, movimento, entre outros.

As manutenções de compressores representam um gasto representativo. Para fazer a comparação, foram estudadas as manutenções preventivas necessárias. Essas ocorrem a partir de uma contagem de horas de utilização dos compressores. Outro grande gasto, o principal, é com o custo de energia elétrica, para este item foi feita comparação entre as potências dos motores elétricos de acionamento.

Todo o estudo foi produzido realizando uma extensa pesquisa e união de trabalhos anteriores, publicações de autores e empresas renomadas no ramo de compressores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DE COMPRESSOR DE ÊMBOLO POR COMPRESSOR DO TIPO PARAFUSO

A utilização dos compressores tipo parafuso possuem diversas vantagens se comparados aos compressores de êmbolo. Os mesmos possuem poucas peças móveis, como válvulas de admissão e descarga, já mencionado anteriormente. Deste modo, há a redução dos custos e da frequência de manutenções. Além de serem máquinas que possuem pouca vibração e possuem uma maior vida útil. Garantindo uma maior confiabilidade, maior eficiência energética e capacidade de operar continuamente em plena carga.

Além disto, compressores do tipo parafuso também não possuem espaço morto, assim o rendimento volumétrico devido ao espaço morto não existe para este caso, outra vantagem sobre o de êmbolo. Contudo, deve ser estudado qual a aplicação desses compressores para se fazer a menor escolha com o menor custo.

Além de todas essas vantagens, os do tipo parafuso apresentam menos vibração, portanto menos ruído, devido ao funcionamento do mesmo. Os do tipo parafuso, tem fluxo contínuo, diferentemente dos de êmbolo que apresentam fluxo pulsado. Esse fluxo contínuo acarreta a uma mínima pulsação, gerando menos vibração. A menor vibração também proporciona menor desgaste das peças da máquina e maior vida útil, uma outra vantagem.

A seguir serão expostos resultados encontrados nas bibliografias e os mesmos discutidos.

4.1.1. EM RELAÇÃO À EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA

Como apontado na revisão bibliográfica, a eficiência volumétrica depende do volume morto, este por sua vez influencia negativamente. Assim quanto maior for o volume morto de um compressor, menor será sua eficiência volumétrica.

O compressor de êmbolo tem suas limitações, devido a folgas necessárias para o deslocamento das válvulas de sucção e descarga. Logo, sempre há uma pequena quantidade de gás deixado para trás no cilindro. Este gás sofre uma reexpansão, gerando uma redução na eficiência volumétrica de compressores alternativos. No entanto, não é o que ocorre em compressores do tipo parafuso, onde não há a expansão do gás residual e a inexistência de efeito negativo do volume morto.

Analisando a equação 2.10 (tópico 2.5, apresentada novamente a seguir como equação 4.1).

$$\eta_{VT} = 1 + m \left[- \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} + 1 \right] \quad 4.1$$

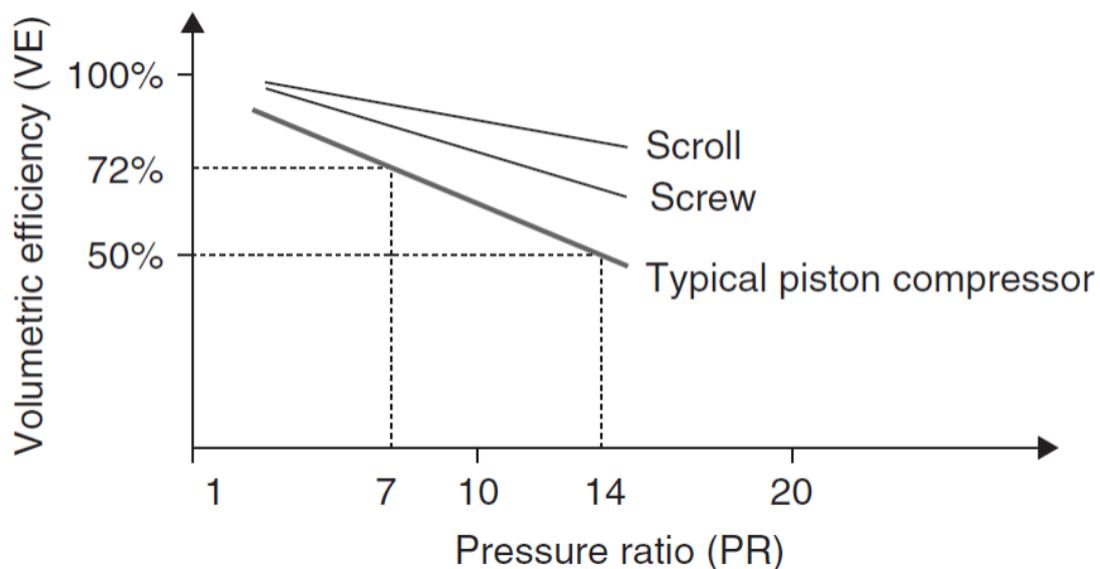
O maior valor de eficiência volumétrica, acontece quando V_0 se torna nulo. Lembrando do volume morto em m (equação 2.9, apresentada novamente como equação 4.2). Para um compressor de êmbolo esse volume V_0 é indispensável. Deste modo, a eficiência volumétrica desse compressor sempre será dependente de V_0 .

$$\frac{V_0}{V_c} = m \quad 4.2$$

Contudo, levando em consideração os compressores rotativos tipo parafuso e fazendo a análise em cima da perda dada pelo volume morto, é evidente que ele por sua construção e funcionamento, como já dito anteriormente, não perde eficiência volumétrica devido à reexpansão dos gases presos no volume morto. Desta forma, compressores do tipo parafuso podem conseguir maior eficiência volumétrica.

Para melhor compreensão, a Figura 4.1 a seguir expressa a eficiência volumétrica de compressores alternativos com relação à razão de compressão. Observa-se no gráfico da que a eficiência volumétrica dos compressores do tipo parafuso é maior que a do compressor de êmbolo.

Figura 4.1 - Eficiência volumétrica de compressores.

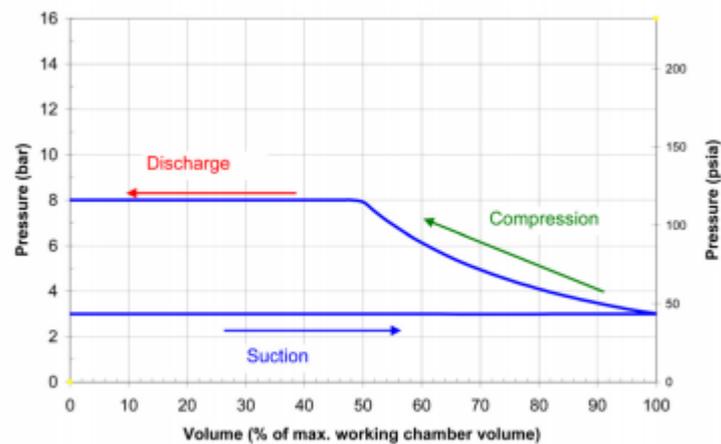


Fonte: VIA University College. Disponível em:

<<https://www.cartagena99.com/recursos/tuneapdf/index.php?archivo=alumnos/apuntes/DES%204.%20Refrigeration%20circuit%20components.pdf>>.

Para fins de comparação, observando os diagramas de pressão *versus* volume, apresentados na Figura 4.2 e Figura 2.10 (tópico 2.5), percebe-se que há diferença entre eles, em que o diagrama do compressor parafuso não tem a parcela de volume morto.

Figura 4.2 - Diagrama de pressão *versus* volume idealizado para um compressor de parafuso.



Fonte: *Thermodynamic Model of a Screw Compressor*, van Bommel, 2016.

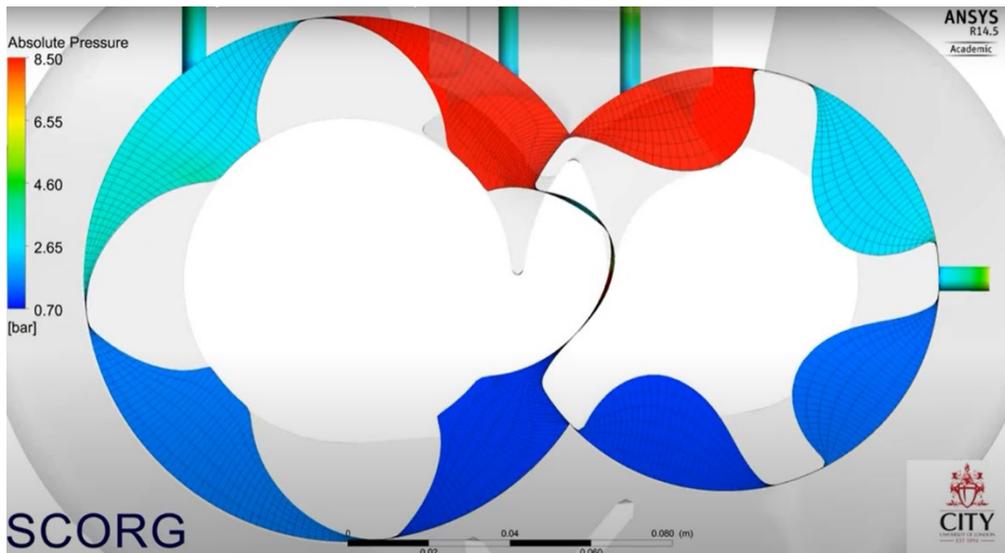
As figuras a seguir foram expostas para melhor visualização dos espaços entre os rotores, demonstrando a não existência de espaço morto.

Figura 4.3 - Espaço entre rotores, compressor parafuso.



Fonte: © Israel Pneumatic. Disponível em: <https://israelpneumatic.com.br/como-funciona-o-compressor-de-parafuso/>.

Figura 4.4 - Espaços entre rotores, compressor parafuso, simulação.

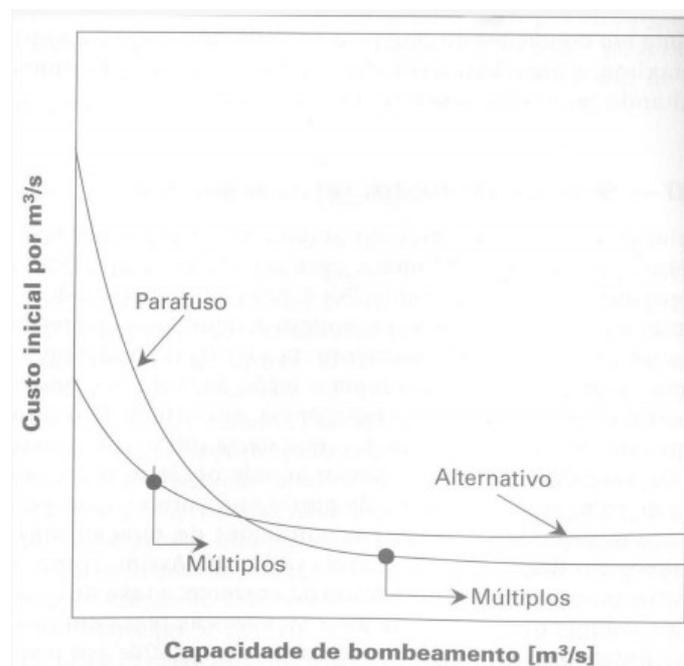


Fonte: Youtube (2017).

4.1.2. CUSTO DE AQUISIÇÃO

O compressor de êmbolo tem menor custo comparado com o de parafuso. São máquinas mais simples e robustas. Mas conseguem trabalhar com menores vazões. São indicados para uso em pequenas instalações, por esse motivo. Os compressores de parafuso são mais vantajosos para grandes capacidades, como pode ser observado na figura a seguir.

Figura 4.5 - Capacidade de bombeamento *versus* custo inicial por m^3/s .



Fonte: Autor desconhecido. Disponível em:
<https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/e/e1/Compressores_2.pdf>.

O esquema a seguir exposto na Figura 4.6 mostra a diferença de custos de propriedade entre os dois tipos de compressores, êmbolo e parafuso, para as mesmas condições de operação, apresentadas no Manual de Ar Comprimido (METALPLAN, 2010). As condições são:

- vazão requerida de 96 pcm (pés cúbicos por minuto);
- período comparado de 48 mil horas.

Figura 4.6 - Custo de Propriedade entre compressores de êmbolo e de parafusos, nas mesmas condições de operação.



Fonte: METALPLAN, 2010. Adaptada.

Para esta comparação, observa-se aquisição de três compressores de êmbolo (15 Hp) e dois compressores de parafuso (15 Hp). Pode ser observado também as outras vantagens de economia além do custo de aquisição. Nesse exemplo apresentado pela Metalplan (2010), e expresso na figura acima, para se conseguir a mesma vazão e o mesmo consumo em potência do compressor, foi necessária a aquisição de um compressor de êmbolo a mais. Assim, para essa demanda em vazão aquisição de compressores de parafuso é mais vantajosa.

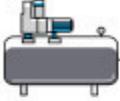
Portanto, uma análise mais cautelosa deve ser feita para cada tipo de demanda de ar comprimido, pois mesmo com um custo por unidade maior os compressores do tipo parafuso podem ser mais vantajosos na aquisição.

4.1.3. GASTO COM ENERGIA ELÉTRICA

Os compressores do tipo parafuso em comparação com outros compressores produzem mais ar comprimido por kW de energia absorvida da rede elétrica, exceto os turbocompressores axiais, que possuem preços muito elevados e fabricados apenas em maiores potências (ISRAEL PNEUMATIC). Segundo a Israel Pneumatic, empresa especializada em vendas, locações, manutenções preventivas e corretivas de compressores, a economia de energia desses compressores parafuso é resultado do desempenho mecânico do mesmo, por não possuir muito atrito como os compressores de êmbolo e pelo processo de compressão ocorrer de forma contínua e não intermitente.

Na comparação dos compressores de êmbolo e parafuso, o parafuso apresenta vantagens quanto ao rendimento e consumo de energia elétrica, sendo a vazão 30% maior e o consumo de energia 36% menor (ATLAS COPCO, 2018). Como exemplo, de acordo com a Atlas Copco (2020), para uma operação hipotética em condições de demanda de 41 pcm, operação anual de 3 120 horas e a um custo de energia de R\$ 0,50 por kW, utilizando os dois tipos de compressores, alternativo de êmbolo e parafuso, foram encontrados os resultados listados na figura abaixo.

Figura 4.7- Comparação de gasto energético entre compressor de êmbolo e parafuso.

| Tipos de compressor | Potência máxima | Mínima banda de pressão nominal possível | Motor elétrico - Custo de energia | Banda de pressão - Custo de energia adicional* | Custo de energia total |
|--|--------------------------------------|--|-----------------------------------|--|------------------------|
|  Compressor de pistão | 15 Hp | 11 Hp | R\$ 16.751,00 | R\$ 3.664,00 | R\$ 20.415,00 |
|  Compressor parafuso | 10 Hp (modelo G7 100 Atlas Copco) | 7,5 Hp | R\$ 11.700,00 | Zero | R\$ 11.700,00 |

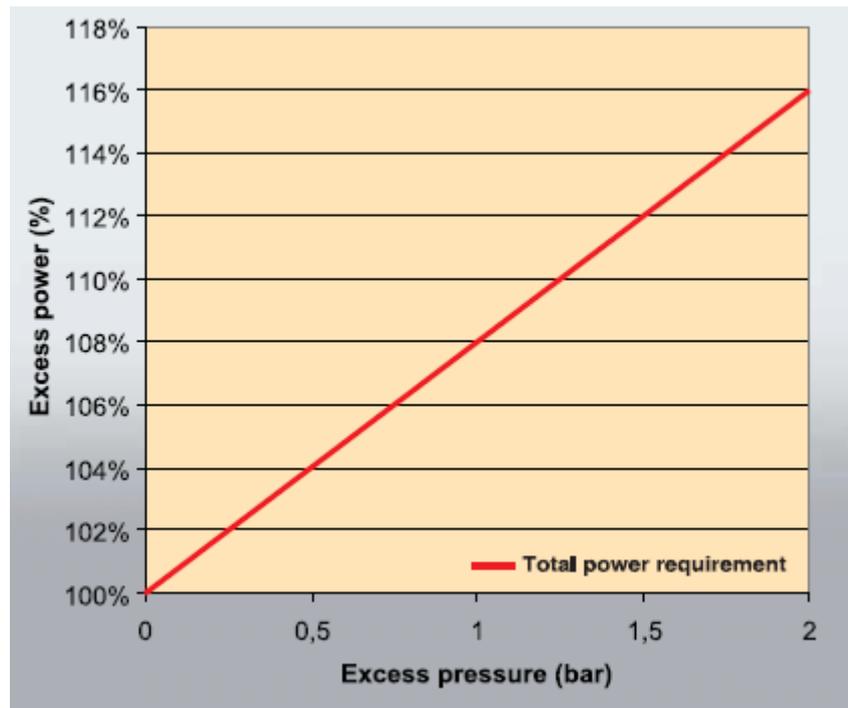
*Cada 1bar de pressão a mais aumenta o custo de energia em 7%

Fonte: © Atlas Copco. Adaptada. Disponível em <https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/compressor-de-pistao-x-compressor-de-parafuso-qual-o-melhor/>.

Pode ser observado na Figura 4.7 que o compressor tipo parafuso demanda uma menor potência do motor elétrico gerando um menor gasto de energia comparado ao de êmbolo. Essa economia é em torno de 57%. O excedente de pressão se dá apenas para o compressor de êmbolo, devido a este compressor trabalhar com banda de pressão fixa, diferente do parafuso que consegue se adaptar à demanda (através de reguladores) de pressão e trabalhar com o necessário.

Para se entender sobre o excedente de pressão, o gráfico a seguir exhibe a exigência de energia excessiva resultante da sobrepressurização para compensar as quedas de pressão. Para um compressor de 300 L/s de vazão, aumentar a pressão de trabalho em 1 bar significa um consumo de energia elétrica de 6 kW, assim, em 4 000 horas de operação por ano, representa 24 000 kWh/ano ou 2 400 euros por ano (ATLAS COPCO, 2010).

Figura 4.8 - Excesso de potência versus excesso de pressão.

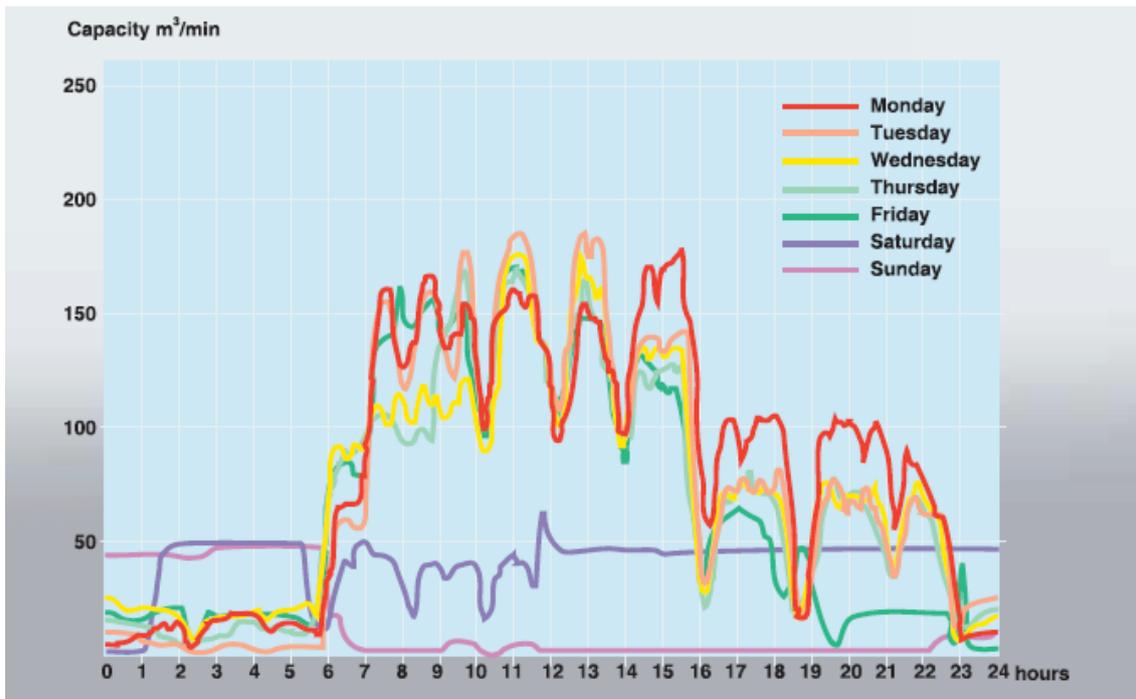


Fonte: ATLAS COPCO, 2010.

4.1.4. UTILIZAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A demanda de ar comprimido de uma empresa é variável, nem sempre ela precisa do máximo de vazão que o compressor dimensionado consegue produzir. A Figura 4.9 seguir apresenta um diagrama, no qual demonstra a demanda de ar comprimido durante 24 horas para cada dia da semana.

Figura 4.9 - Demanda de ar comprimido diária para cada dia da semana.



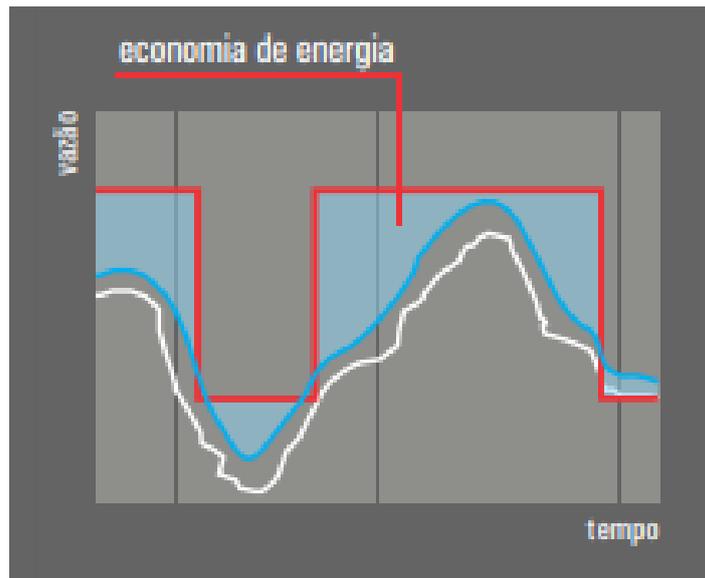
Fonte: ATLAS COPCO, 2010.

Observando a imagem é nítido que a variação da demanda é muito alta, o uso de compressores de velocidade fixa inviabiliza o processo de produção. Para um melhor aproveitamento, a utilização de compressores com variação de velocidade é uma ótima opção. O compressor do tipo parafuso oferece uma vantagem em relação ao compressor de êmbolo por permitir a utilização de um inversor de frequência.

A variação de velocidade é eventualmente utilizada nos sistemas de ar comprimido que utilizam compressores do tipo parafuso para controle da capacidade de compressão do gás. Esse controle é dado pela capacidade desses inversores de variar a velocidade de rotação do motor elétrico. Existem outras formas de variar a capacidade de carga de compressores. Este trabalho visa obter informações a respeito apenas dos inversores de frequência. De acordo com a Chicago Pneumatic (2008) a utilização de inversores de frequência é consagrada desde os anos 80.

As figuras a seguir representam uma ilustração demonstrativa da economia de energia com a utilização de inversores de frequência (Figura 4.10) e comparação entre compressor de velocidade fixa e de velocidade variável (Figura 4.11). Observa-se a variação da vazão ao longo do tempo.

Figura 4.10 - Variação de vazão ao longo do tempo.

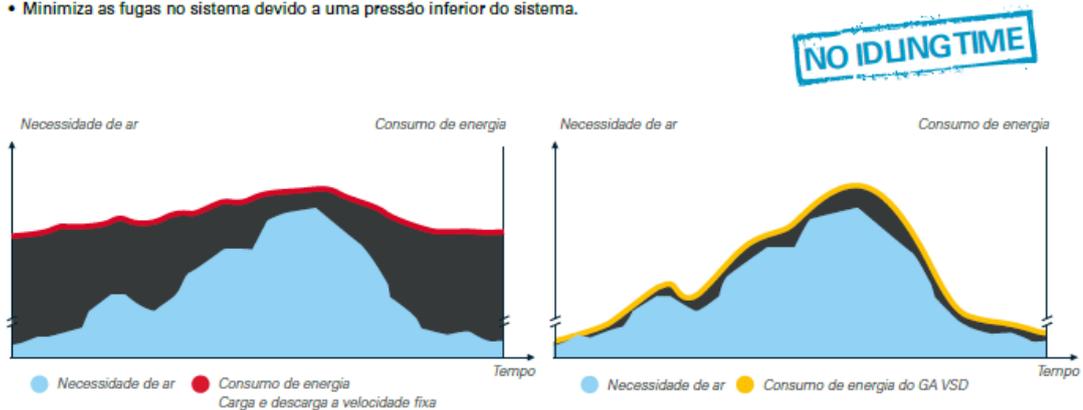


Fonte: METALPLAN.

Disponível em: <<http://metalplan.com.br/wp-content/uploads/2018/07/catalogo-completo.pdf>>.

Figura 4.11 - Necessidade de ar comprimido ao longo do tempo, compressor velocidade fixa x compressor velocidade variável.

- Minimiza as fugas no sistema devido a uma pressão inferior do sistema.



Fonte: ATLAS COPCO.

Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/6-vantagens-de-um-compressor-de-parafuso/>>.

O custo que mais conta no gasto em sistemas de ar comprimido é com a energia elétrica, representando cerca de 75% do total. Assim, quanto mais opções de diminuir esse custo melhor e maior é o impacto na redução do mesmo. O uso do inversor de frequência se justifica por representar o percentual mais significativo de economia de energia, aproximadamente 30% e contribui para a redução do desgaste mecânico, redução da demanda de energia, melhoria do fator de potência e automatização do sistema para empresas que buscam

reduções de custo (OLIVEIRA; ALVES; ARAÚJO; SEIXAS; COELHO; QUINTINO; PIAZZA, 2016).

Figura 4.12 - Redução de gastos com energia elétrica pela utilização de inversor de frequência.



Fonte: © Arpressi. Disponível em <<http://www.arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227>>.

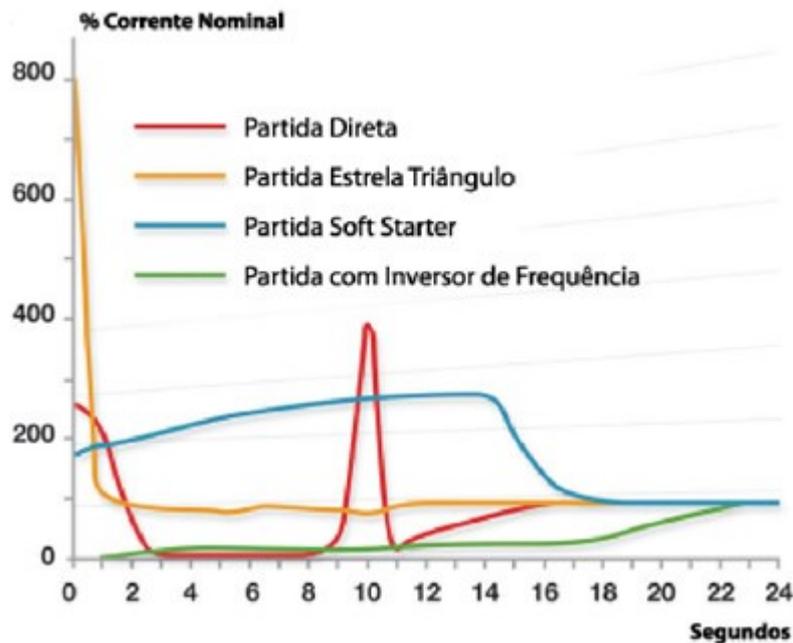
Segundo Tessaro e Michels (2014), a evolução do sistema de inversores de frequência visa economia de energia, menor desgaste da máquina e estabilização da pressão da linha de ar comprimido. Esse sistema é composto por um inversor de frequência que é diretamente controlado por um transdutor de pressão. Este transdutor realiza a leitura de pressão da rede de ar comprimido e envia sinal para o inversor aumentar ou diminuir a frequência do motor elétrico e conseqüentemente controlando a rotação do motor.

O transdutor de pressão é instalado na saída do ar comprimido para a fábrica, antes dos secadores, permitindo que seja realizado o monitoramento da pressão em local comum a todos os compressores instalados na rede de ar comprimido. E informa as necessidades de ar comprimido para manter a pressão

O consumo de energético é diretamente proporcional à quantidade de ar comprimido consumido, pois com a utilização do inversor, a rotação do motor é ajustada em função da necessidade de ar comprimido da indústria, permitindo evitar os ciclos de funcionamento em vazio e reduzir consideravelmente a energia elétrica consumida (TESSARO; MICHELS, 2014).

Em unidades compressoras com inversores de frequência não há picos de corrente, não há superaquecimento e tão pouco sobrecarga nos elementos de transmissão, possibilitando uma maior vida útil dos rolamentos correias e acoplamentos (ARPRESSI).

Figura 4.13 - Partidas em compressores, comparação.



Fonte: © Arpressi. Disponível em <http://www.arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227>.

Tessaro e Michels (2014) chegaram a conclusão, a partir de seu projeto e nas condições estudadas por eles, de que na substituição de um compressor de parafuso rotativo de velocidade fixa pelo equipamento de velocidade variável gera economia de 35% de energia elétrica. As condições estudadas por eles foram:

- a condição de trabalho da fábrica foi de 140 horas semanais;
- o compressor a ser substituído foi fabricado em 1998, de potência 100 Hp e vazão de 365 pcm. Em média no período de estudo de 6 meses apresentou 77,9% do tempo desligado e 35,15 % funcionando. Desse tempo em funcionamento, 51,38 % em carga e 48,62% em alívio
- o compressor a ser comparado com potência de 100 Hp e faixa de vazão de 114 a 476 pcm.

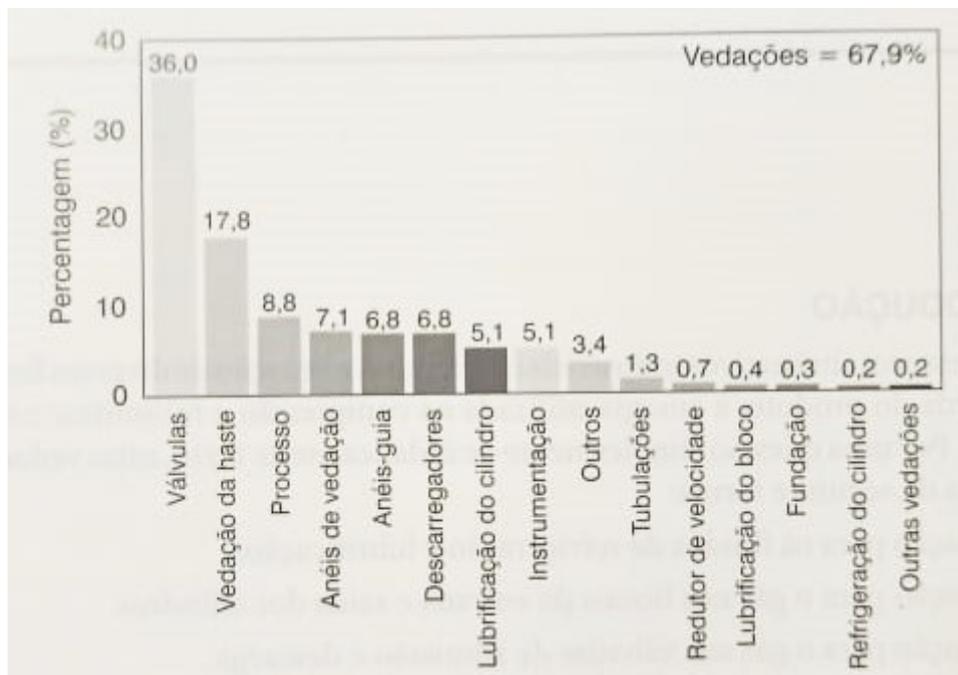
4.1.5. MANUTENÇÃO

Todo equipamento para manter um bom funcionamento e uma boa vida útil precisa de algum tipo manutenção, gerando custos, esses custos com manutenção, como já avaliado neste trabalho, são pequenos em relação a todo custo com um sistema de ar comprimido. Porém, esses podem ser reduzidos. Segundo algumas empresas, como a Hipress e a Metalplan, os custos de manutenção são 70% mais baratos na utilização de compressores do tipo parafuso.

Tomando para discussão os custos com manutenção extraídos da Chicago Pneumatic (2008), que representam cerca de 8% dos custos com compressores convencionais. Uma diminuição de 70% nesses gastos reflete uma diminuição de aproximadamente 5,6% em relação ao total de gastos. Essa redução é considerável em relação ao todo, já que acontece apenas pela substituição do tipo de compressor.

Com relação aos compressores alternativos, as válvulas e vedações destes compressores são as principais causas de indisponibilidade das máquinas. Isso quer dizer que elas geram o principal motivo de manutenção. A Figura 4.14 apresenta as principais causas de indisponibilidade dos compressores alternativos. Os compressores de êmbolo entram nessa estatística, diferente dos compressores do tipo parafuso que não possuem válvulas de admissão e descarga.

Figura 4.14 - Principais causas de indisponibilidade dos compressores alternativos.



Fonte: NÓBREGA, 2011.

Para comparação das manutenções preventivas dos compressores, estas são programadas para ocorrer a partir de um determinado número de horas de funcionamento. Portanto, depois de discutido a diminuição dos gastos apenas pelo tipo de compressor. Também é importante a análise da frequência de ocorrências das tais.

Segundo a Zabatt Power Stems, empresa fornecedora de equipamentos e serviços industriais nos Estados Unidos, as manutenções de compressores do tipo parafuso *oilfree* (isento óleo) são realizadas, diariamente para monitoramento e registro, nas primeiras 50 horas, leituras de condições

operacionais e ajustes necessários feitos. A cada 3 000 horas, para verificação ou troca de lubrificante, elementos filtrantes, de válvula de drenagem de condensado, verificação das condições do elemento de acoplamento do eixo e apertos, medições e registros de vibração, entre outras. A cada 15 000 horas, para limpeza e verificação de trocador de calor, válvulas, tubulações, filtros, bomba de sucção de lubrificantes, verificação de condições dos isolamentos, dentre outros.

Para os compressores alternativos com *air-cooled* (resfriamento a ar) são indicadas manutenções diárias, a cada 8 horas, para verificação de nível de lubrificante, drenagem do reservatório e verificações de em geral. Manutenções a cada 40 horas para inspeções, limpeza e verificações, a cada 160 horas para verificação de tensão nas correias. Ainda, manutenções a cada 500 horas para troca de lubrificantes. Verificação do filtro de lubrificantes e aperto de parafusos. A cada 1000 horas para troca de lubrificante sintéticos caso utilize, inspeção de válvulas e limpeza do cárter. Além disso, a cada 2 000 horas, inspeção de pressão dos diafragmas (do tipo diafragma) e contatos, e inspeções nos pontos de contato na partida do motor.

A Zabatt também recomenda para compressores alternativos de dupla ação resfriados a água, manutenção a cada 8 horas para verificação de nível e pressão do óleo lubrificante, verificação da temperatura da água de resfriamento da camisa do cilindro, operação de controle e capacidade, observar descarga do manômetro para pressão de carga e descarga adequadas, drenagem do filtro, verificação de funcionamento do purgador, drenagem de condensado, verificar pressão do intercooler.

No *Compressed Air Manual*, 2010 da © Atlas Copco Airpower NV, Belgium, é citado que o orçamento total de manutenção é afetado pelo tipo de compressor, além do carregamento e descarregamento do ciclo operacional, equipamento auxiliares (filtro, secadores, controle e regulação do equipamento), condições de instalação e outros. Nas citações acima, não foi mencionado com precisão todas as verificações necessárias para os compressores citados, no entanto conclui-se que a frequência de manutenção dos compressores alternativos é maior comparada à do de parafuso. Por esta análise, pode ser constatado a dependência do tipo de compressor no custo das manutenções. E servindo como explicação, como o compressor de parafuso tem um menor número de peças móveis, este requerer menos manutenções.

O compressor de parafuso necessita de elementos periféricos de maior custo, mas a demanda de paradas para manutenções é menor, e considerando todas as paradas, os custos das peças de reposição para os dois tipos são quase iguais, mas os custos de mão de obra são bem maiores para o de êmbolo (ATLAS COPCO, 2020).

A tabela a seguir mostra as vantagens do compressor parafuso sobre o de êmbolo com relação às manutenções.

Tabela 4.1 - Comparação êmbolo *versus* parafuso, manutenção.

| Taxas X Compressores | Pistão | Parafuso |
|------------------------|------------------|------------------------|
| Troca de óleo | A cada 200 horas | De 4 mil a 8 mil horas |
| Custo Manutenção | Regular/Alto | 70% mais barato |
| Ruído | Alto | Não tem ruído |
| Taxa de Economia Geral | Baixa | Alta |

Fonte: HIPRESS, 2019.

Disponível em: <[#### 4.2. VANTAGENS COMPRESSOR PARAFUSO VERSUS ÊMBOLO](http://www.hipress.com.br/qual-a-diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-de-pistao/#:~:text=No%20compressor%20a%20parafuso%2C%20h%C3%A1,pot%C3%Aancia%20do%20motor%20(CV)>>.</p>
</div>
<div data-bbox=)

A partir dos resultados encontrados e discutidos, foi elaborada a tabela a seguir, para melhor visualização das vantagens do compressor de parafuso sobre o de êmbolo.

Tabela 4.2 - Comparação compressor parafuso versus êmbolo, vantagens.

| COMPRESSOR | PARAFUSO | ÊMBOLO |
|----------------------------|---|----------------------------|
| CUSTO INICIAL | Custo maior | Menor |
| CUSTO PROPIEDADE | 0,046 reais/m ³ | 0,071 reais/m ³ |
| EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA | Consegue atingir maiores valores | Menor |
| GASTO COM ENERGIA ELÉTRICA | Menor | Maior |
| INVERSOR DE FREQUÊNCIA | Sim e com redução de 30 a 35% nos custos com energia elétrica | Não |
| MANUTENÇÃO | Menores gastos | Maior custo |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os parâmetros analisados no trabalho foram custo de aquisição, eficiência volumétrica, gastos com energia elétrica, utilização de inversor de frequência em sistemas com compressores parafuso e manutenção de compressores.

Foi possível observar através das referências que a eficiência volumétrica de compressores de parafuso é independente do volume morto e, portanto, superior àquela dos compressores de êmbolo. Além disso, o compressor parafuso trabalha com um fluxo contínuo, gerando menos vibrações e ruídos.

Com relação aos custos de aquisição os compressores do tipo parafuso apresentam custos de aquisição menores que os de êmbolo para maiores capacidades de bombeamento. Os valores encontrados como referência de custo de propriedade para a operação destacada no tópico 4.1.2 foram 0,071 reais/m³ para compressores de êmbolo e 0,046 reais/m³ para os de parafuso. Embora o custo inicial do compressor parafuso seja superior ao custo do compressor alternativo para menores capacidades de bombeamento, esse pode ser compensado pela economia energética, menores custos de manutenção.

Os gastos com energia elétrica se mostraram maiores para os compressores de êmbolo, devido a menor potência do motor elétrico do compressor de parafuso para conseguir a mesma vazão de ar comprimido que o outro compressor. A partir das análises e discussões a implantação de inversor de frequência no sistema de compressão de compressores do tipo parafuso acarretam uma economia de energia em torno de 30 a 35% do custo total. Sendo uma grande vantagem sobre o de êmbolo que não permite a utilização de inversores de frequência pelo seu regime de funcionamento ser intermitente. Além disso, a redução de picos de corrente na partida de compressores com inversor de frequência possibilita a maior vida útil dos rolamentos, correias e acoplamentos.

As manutenções de compressores de êmbolo têm maiores custos, devido a maior frequência. Os compressores parafuso tem menos peças móveis, o que gera uma menor necessidade de manutenções, além de apresentarem fluxo contínuo, acarretando uma mínima pulsação, produzindo menor vibração e com isso proporciona menor desgaste das peças da máquina e maior vida útil. Diferente dos compressores de êmbolo que apresentam fluxo pulsado.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou como objetivo principal o estudo da viabilidade da substituição de compressores alternativos de êmbolo por compressores rotativos do tipo parafuso. Para isto, inicialmente, foram introduzidos os conceitos mais importantes a respeito dos dois compressores, funcionamento, componentes básicos e conceitos de compressão de gases, eficiência volumétrica, unidade compressora e aplicações de compressores.

A partir da fundamentação desde projeto, foi possível concluir a viabilidade da substituição dos compressores, especialmente para médias e grandes demandas de ar comprimido, situação em que compressores do tipo parafuso apresentam redução de custos. No entanto, para condições de aplicações mais simples, como serviços de oficina, com baixas demandas de ar, talvez o custo inicial do compressor do tipo parafuso não seja viável. Portanto, a análise energética juntamente à análise do custo inicial faz-se necessária.

Esse estudo permitiu concluir que há grandes vantagens dos compressores do tipo parafuso em relação aos compressores alternativos. A substituição desses compressores é recomendada em aplicações industriais, proporcionando possivelmente maior redução nos custos totais. No entanto, salienta-se a importância de executar cálculos comparativos para situações reais, visando corroborar a teoria apresentada no presente trabalho.

SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

É sugerido o trabalho futuro como sequência deste:

a) Representação/análise experimental da substituição de compressores alternativos de êmbolo por compressores rotativos tipo parafuso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PIAZZA, J. P. A. **Construção de uma Bancada Didática com Compressor Alternativo**. 2018.

NÓBREGA, P. R. L. **Manutenção de Compressores Alternativos e Centrífgos**. Synergia: IBP: Rio de Janeiro, 2011. 445 p.

SILVA, N. F. **Compressores Alternativos Industriais: teoria e prática**. Interciência: Rio de Janeiro, 2009. 444 p.

MARQUES, R. P. **Aspectos Gerais de Instrumentação**. 2017.

CASTRO, H. P. Material do curso de Eletrotécnica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará.

SILVA, J. C. Notas de aula, Sistemas de Controle Hidráulicos e Pneumáticos. Uberlândia.

OLIVEIRA, E. M.; ALVES, E. F. I.; ARAÚJO, F. M.; SEIXAS, T. G.; COELHO, M. T.; QUINTINO, L. F. PIAZZA, C. A. D. **Eficiência energética em compressor com o uso de inversor**. Faculdade Carlos Drummond de Andrade/ Engenharia Eletrônica com Ênfase em Automação: São Paulo, SP. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo102_r01.pdf>. Acesso em: 08 de setembro de 2020.

TESSARO, S. A.; MICHELS, A. **Desempenho Comparativo entre Compressores Rotativos de Parafuso com Velocidade Fixa e Variável**. 2014. 40 P.

UNICEN. **Fundamentos de Hidráulica e Pneumática Compressores Parafuso**. Material de aula da Faculdade UNICEN, curso Tecnólogo em Mecanização Agrícola.

UFTPR. **Compressores**. Servidor de pastas da UFPR. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~rudmar/refri/material/5_COMPRESSORES.pdf>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

TOUZA, V. A. **Análise da Performance de Compressores pelo Modelo de Redlich/Kwong**. UFRJ: Escola Politécnica: Rio de Janeiro, 2015.

MAGALHÃES, W. F.; FERNANDES, N. G.; CESAR, A. **Físico-Química I**. Notas de aula curso de Química. UFMG. 2009.

MOREIRA, R. DA S. **Comparação da Viabilidade Técnica-Econômica em Condicionamento de Ar: Compressor a Pistão versus Compressor Rotativo de Velocidade Variável**. Guaratinguetá, 2009. 114 p.

ROLLINS, J. P. **Manual de Ar Comprimido e Gases**. Prentice Hall: São Paulo, 2004.

METALPLAN. **Manual de Ar Comprimido**. 6ª ed. 2017.

ROCHA, C. R.; MONTEIRO, M. A. G. **Manual Prático, Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. Eletrobrás/Procel: Rio de Janeiro. 87 p.

COLLINS, B.; JONES, T.; MCGLYNN, MCKANE, A., MOTLEY, M., POWELL, H. **Assessment of the market for compressed air efficiency services**. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: US Department of Energy, Burlington, Massachusetts, 1998.

PERRONE, F. P. D.; AFONSO, S.; CAVALCANTI, E. S. C.; CAPELLA, P. DA S. **A Solução no Caso Daimlerchrysler para Redução do Consumo de Energia em Sistemas de Ar Comprimido**. 2001.

SHULZ. **Catálogo Geral de Produtos**. 2018. Disponível em: <<https://www.schulz.com.br/wp-content/uploads/2018/11/Catalogo-Motocompressores-de-Pistao-Schulz-Jet-Facil-ago-18-MI.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2021.

ZABATT. **Routine Compressor Maintenance**. Disponível em: <<https://www.quincycompressor.com/wp-content/uploads/2020/08/zabatt-compressor-maintenance.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2021.

ELETROBRAS; PROCEL. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Industrial – Alta Tensão**. Ano base 2005. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

CHICAGO PNEUMATIC. **Compressores Elétricos de Velocidade Variável – VPVS**. 2008. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1849014/>>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

ISRAEL PNEUMATIC. **Como Funciona o Compressor de Parafuso**. 2016. Disponível em: <<https://israelpneumatic.com.br/como-funciona-o-compressor-de-parafuso/>>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

Compressor Parafuso - Resumo. **Youtube**. 15 de março de 2012. 3min40s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=CGiFuZEwdJs>>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

CFD Simulation of Oil Injected Twin Screw Compressor. **Youtube**. 2 de julho de 2017. 3min13s (1min42s). il. color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qyMYLbqTe2M>>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

ATLAS COPCO. **Compressor de pistão x compressor de parafuso: qual o melhor para pequenas e médias empresas?** 2020. Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/compressor-de-pistao-x-compressor-de-parafuso-qual-o-melhor/>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

ARPRESSI. **Compressor com inversor de frequência**. Disponível em: <<http://www.arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227>>. Acesso em: 30 de maio de 2021.

ATLAS COPCO. **Compressor Air Manual**. Belgium, 2010.

METALPLAN. **Manual de Ar Comprimido**. 4ª ed. 2010.

ATLAS COPCO. **Compressor parafuso x compressor de pistão: qual é a melhor opção para um laboratório óptico?** 2018. Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/compressor-parafuso-x-compressor-de-pistao/>>. Acesso em: 1 de junho de 2021.

NARAHARA, F. M. **Ar comprimido: o sopro que a indústria precisa**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/a/ar-comprimido-o-sopro-que-a-industria-precisa_12665>. Acesso em: 29 de maio de 2021.

VIA UNIVERSITY COLLEGE. **DESM1 Refrigeration circuit, componentes**. Disponível em: <<https://www.cartagena99.com/recursos/tuneapdf/index.php?archivo=alumnos/apuntes/DES%20.%20Refrigeration%20circuit%20components.pdf>>. Acesso em: 2 de junho de 2021.

METALPLAN. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<http://metalplan.com.br/wp-content/uploads/2018/07/catalogo-completo.pdf>>. Acesso em: **2 de junho de 2021**.

AIR PRESS. **Diferença entre Compressores de Parafuso e Compressores de Pistão**. Disponível em: <<https://www.airpresscompressores.com.br/diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-compressores-de-pistao/#>>. Acesso em: 2 de junho de 2021.

VAN BOMMEL, L. L. **Thermodynamic Modelo f a Screw Compressor**. Delft University of Technology, August 2016. il. color.

HIPRESS. **Qual a diferença entre compressores de parafuso e de pistão.** 2019. Disponível em: <[http://www.hipress.com.br/qual-a-diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-de-pistao/#:~:text=No%20compressor%20a%20parafuso%2C%20h%C3%A1,pot%C3%Aancia%20do%20motor%20\(CV\)>](http://www.hipress.com.br/qual-a-diferenca-entre-compressores-de-parafuso-e-de-pistao/#:~:text=No%20compressor%20a%20parafuso%2C%20h%C3%A1,pot%C3%Aancia%20do%20motor%20(CV)>)>. Acesso em: 6 de junho de 2021.

ATLAS COPCO. **6 vantagens de um compressor de parafuso lubrificado com velocidade variável (VSD+).** 2019. Disponível em <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/6-vantagens-de-um-compressor-de-parafuso/>>. Acesso em: 6 de junho de 2021. il. color.