

N. CLASS.	M620.1
CUTTER	F587e
ANO/EDIÇÃO	2015

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DENIS FRANCISCO BATISTA FLAUSINO**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM COMPRESSOR COM INVERSOR,  
COMPARADO AO DE CARGA-ALÍVIO.**

**Varginha**  
**2015**

**DENIS FRANCISCO BATISTA FLAUSINO**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM COMPRESSOR COM INVERSOR,  
COMPARADO AO DE CARGA-ALÍVIO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Esp. Rafael José Nogueira Rosa.

**Varginha**

**2015**

**DENIS FRANCISCO BATISTA FLAUSINO**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM COMPRESSOR COM INVERSOR,  
COMPARADO AO DE CARGA-ALÍVIO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.: André Pacífico de Sousa

---

Prof.: Thiago Cornélio da Fonseca

---

Prof.:

**OBS:**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela sabedoria e força dadas durante todo o período do curso e a minha esposa, pelo apoio moral, paciência e incentivo nesta etapa de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e todos que me ajudaram a elaborar este trabalho, principalmente aos companheiros de trabalho e aos professores pelo conhecimento transmitido neste período.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13.

## RESUMO

A eficiência energética dos compressores equipado com inversores de frequência chegou ao alcance das empresas e indústrias para substituírem os compressores de Carga/Alívio quem tem o consumo de energia elevado, pois mesmo quando não há a necessidade de produção de ar comprimido eles continuam funcionando sem necessidade. Por outro lado os compressores com inversor de frequência diminuem o consumo de energia como também o lado financeiro, juntamente a uma maior vida útil dos equipamentos de produção de ar comprimido, pois o sistema de funcionamento dele é de acordo com a demanda. Mas o ponto mais importante do trabalho é dedicado para o lado ambiental e sustentável, pois hoje no país estamos enfrentando uma crise hídrica devido aos dois últimos anos por não ter chovido o mínimo esperado por ano, e também estamos passando por uma crise política e econômica que por outro lado fez aumentar o custo das tarifas de energia em até 53% em algumas regiões do país. Hoje existem vários fabricantes que desenvolvem estudos dessas tecnologias do uso da inversão de frequência para uma grande baixa no consumo de energia elétrica, e o exemplo usado para fins de pesquisa foi o fabricado pela Atlas Copco e no modelo GA 45 VSD (*Variable Speed Drive*) ou (Inversor de Velocidade Variável), e ao contrário do que muitos pensam sobre os aparelhos ou equipamentos, quanto mais componentes eletrônicos ele possuir mais há o consumo de energia. Muito pelo contrário, existem vários estudos para que se diminua cada vez mais o consumo de energia associando eletrônica e mecânica.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. Carga-alívio. Inversor de frequência.

## **ABSTRACT**

*The energy efficiency of compressors equipped with variable frequency drives come in range of companies and industries to replace the load / Relief compressors who have high power consumption, because even when there is no compressed air production of necessity they continue working without . On the other hand compressors with frequency inverter reduce energy consumption as well as the financial side along the longer life of compressed air production equipment, because the operating system it is according to demand. But the most important point of the work is devoted to the environmental and sustainable hand, because today in the country are facing a water crisis due to the last two years for not having rained the minimum expected by year, and we are also experiencing a political and economic crisis which in turn has increased the cost of energy tariffs by up to 53% in some regions of the country. Today there are several manufacturers who develop studies of these technologies use the inversion frequency for a large low in power consumption, and the example used for research purposes was manufactured by Atlas Copco and GA 45 VSD model (Variable Speed Drive) or (Variable Speed Drive), and contrary to what many think about the devices or equipment, the more electronics he has no more power consumption. On the contrary, there are several studies that it decreases more and more the power consumption involving electronics and mechanics.*

**Keywords:** *Energy efficiency. Load-relief. Frequency inverter.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de compressores.....	16
Figura 2 - Compressor de êmbolo.....	17
Figura 3 - Compressor de êmbolo de dois estágios.....	17
Figura 4 - Compressor de membrana.....	18
Figura 5 - Compressor palhetas.....	18
Figura 6 - Compressor de parafusos.....	19
Figura 7 - Compressor root.....	19
Figura 8 - Turbocompressor axial.....	20
Figura 9 - Turbocompressor radial.....	20
Figura 10 - Diagrama de seleção de compressores.....	21
Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do compressor.....	22
Figura 12 - Economia do VSD.....	26
Figura 13 - Explicação da Potência Elétrica.....	27
Figura 14 - Explicação da Potência Elétrica.....	27
Figura 15 - análise da vibração (janela de velocidade).....	29
Figura 16 - Regulagem de pressão.....	30
Figura 17 - Explicação da Sub estimado do cálculo.....	31

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados do sistema instalado.....	32
Quadro 2 - Dados calculados do sistema instalado.....	33
Quadro 3 - Dados de energia consumida na semana analisada.....	33
Quadro 4 - Dados calculados do sistema simulado.....	34
Quadro 5 - Dados calculados do sistema simulado em valores.....	34
Quadro 6 - Dados de energia consumida no sistema simulado.....	34
Quadro 7 – Comparação.....	35

## SUMÁRIO

<b>1 TEMA.....</b>	<b>12</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICOA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Impacto causados ao meio ambiente com o desperdício de energia elétrica.....	14
2.2 Eficiência energética.....	15
<b>3 COMPRESSORES.....</b>	<b>16</b>
3.1 Tipos de compressores.....	16
3.2 Diagrama de volume e pressão fornecida.....	21
<b>4 COMPRESSOR GA 45 VSD.....</b>	<b>21</b>
4.1 Inversor de frequência - Economia de energia.....	23
4.2 Compressor carga-alívio.....	23
4.2.1 Regulagem da válvula de admissão.....	24
4.3 Variação da velocidade do acionador.....	25
4.3.1 Vantagens e desvantagens do compressor VSD / Carga-alívio.....	25
4.4 Estudos fornecidos pelo fabricante.....	26
4.4.1 Potência elétrica.....	27
4.4.2 Entendendo o que trata no chamado fator de potência.....	28
4.5 Janela de velocidade.....	29
4.6 Economias indiretas.....	30
4.6.1 Economia segundo cálculos teóricos do fabricantes.....	30
4.6.2 Sub estimado.....	31
4.7 Redução financeira no consumo de energia.....	31
4.7.1 Objetivos.....	32
4.7.2 Metodologia.....	32
4.7.3 Eficiência.....	33
4.7.4 Confiabilidade.....	33
4.8 Instalação simulada.....	33
4.8.1 Eficiência.....	34
4.8.2 Confiabilidade.....	35
4.9 Resultados da simulação de um compressor VSD.....	35
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética de compressor equipado com conversor de frequência ou VSD (*Variable Speed Drive*), em relação ao de um compressor de Carga – alívio. Na grande maioria das empresas industriais existe uma grande demanda de ar comprimido característico, com flutuações de acordo com a hora do dia e/ou turnos de trabalhos e também com o dia da semana. Compressores convencionais com sistemas de regulação tradicional não conseguem acompanhar e manter com precisão essas variações de demanda. Como resultado, se tem o desperdício de energia, e também sendo prejudicial ao meio ambiente, pois quanto maior desperdício de energia, maior será a quantidade de águas nos nossos reservatórios hídricos.

Ao longo dos últimos anos pelo baixo índice de chuva em nosso país, temos que recorrer a equipamentos que tenha um baixo consumo de energia elétrica, pois as indústrias nos dias atuais, praticamente é uma das maiores vilãs do consumo de energia.

E o país pela crise que se instalou tanto econômica quanto hídrica, necessita de uma economia de energia o mais rápido possível.

Na teoria, para as empresas baixar o consumo de energia, é preciso baixar a produção ou redução de pessoal, mas nem sempre é assim.

Atualmente, os compressores do tipo parafuso são os mais instalados na maioria das plantas/sites industriais e trabalham em regime intermitente, ou seja, alterna seu funcionamento ora em carga máxima do motor e ora em alívio (motor funcionando mais não gerando ar). Entretanto, quando em alívio esses compressores estão apenas consumindo energia elétrica e sem necessidade produtiva e isso contribui para baixar o fator de potência das instalações elétricas da indústria, além de estarem acelerando seu desgaste dos elementos mecânicos e assim reduzindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção dos equipamentos.

Para uma economia significativa, é necessário que as empresas invistam em equipamentos mais tecnológicos e com baixo índice de consumo de energia, como trocar iluminações por led, compressores equipado com conversores de frequência, onde esse investimento se auto paga em um curto espaço de tempo, pois essa economia de energia é significativa e fácil de mostrar aos gestores das empresas que os adquirirem. Outro ponto importante para economia de energia é quando os equipamentos não tiverem em usos, como nos finais de semanas e feriados, que eles sejam desligados.

Mostrar que a eficiência energética de um compressor equipado com inversor de frequência é uma forma de baixar o consumo de energia nas empresas, em comparação as que usam os tradicionais compressores Carga - Alívio.

Devido aos avanços tecnológicos dos atuais sistemas de produção, está cada vez mais exigente a tecnologia de variação da velocidade, como também o controle da mesma ou até sincronismo de velocidade em sistemas paralelos em motores CA (corrente alternada). Dá-se aí, então a justificativa da necessidade do uso de conversores/inversores de frequência. Mas para o uso desse tipo de dispositivo, o conversor/inversor, algumas definições são indispensáveis no dimensionamento do acionamento motor e conversor/inversor.

E ao contrário do que muitos pensam que os aparelhos ou equipamentos, quanto mais componentes eletrônicos mais há o consumo de energia. Muito pelo contrário, existem vários estudos para que cada vez mais diminua o consumo de energia associando eletrônica e mecânica.

Um exemplo disso são os televisores, cada vez maiores, mais leves e finos e com um baixo consumo de energia e sem contar as tecnologias integradas aos aparelhos nos dias de hoje.

Isso também acontece nas empresas, com equipamentos mais leves, rápidos e seguros tanto para o próprio equipamento quanto para quem opera.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Impactos causados ao meio ambiente com o desperdício de energia elétrica

Segundo Miller:

Nosso planeta pode ser comparado a uma astronave deslocando-se a cem mil quilômetros por hora pelo espaço sideral, sem possibilidade de parada para reabastecimento, mas dispendo de um eficiente sistema de aproveitamento de energia solar e de reciclagem de matéria. Há atualmente, na astronave, ar, água e comida suficiente para manter os passageiros. Tendo em vista o progressivo aumento do número de passageiros, em forma exponencial, e a ausência de portos para abastecimento, podem-se vislumbrar, em médio e longo prazo, problemas sérios para a manutenção de sua população.

Pela segunda lei da termodinâmica, o uso da energia implica degradação de sua qualidade. Como consequência da lei da conservação da massa, os resíduos energéticos (principalmente na forma de calor), somando aos resíduos de matéria, alteram a qualidade do meio ambiente no interior dessa astronave. (1985 apud BRAGA, 2005, p. 2).

O tema energia voltou a ser prioritário nas discussões atuais em todo o mundo por diferentes razões: pré-sal, gás natural, energias renováveis, biodiesel, geopolíticas econômicas, crescimento acelerado da demanda de energia, questões ambientais e efeito estufa. Essa condição foi acentuada pela COP 15, recentemente ocorrida e que reuniu representações mundiais para a discussão dos comportamentos e do futuro do planeta. Em 1883 entrou em operação a primeira usina hidrelétrica brasileira, localizada no Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, em Diamantina - MG. Outras usinas de pequeno porte foram implantadas, mas incapazes de absorver toda a necessidade do consumo. No ano 1950 o Brasil enfrentou, de forma mais efetiva, uma fase de grande crescimento socioeconômico, com importante evolução industrial iniciada na década de 1940, impulsionada, dentre outros, pela entrada de capitais privados estrangeiros no país. Instalou-se em 1954 a montadora da VW em São Paulo, dando início a uma vocação industrial que se consolidaria na região, com a chegada de outras montadoras e negócios paralelos para abastecer a demanda. A energia elétrica era insumo propulsor desse processo.

O país, na época, contava com uma população aproximada de 53 milhões de habitantes e vivia sob uma política econômica nacionalista, com intuito de atender às demandas sociais, processo crescente de urbanização, combinada com a aceleração do crescimento econômico, característico da pós-revolução industrial. O governo estabeleceu diretrizes claras para a superação das dificuldades inerentes ao desenvolvimento brasileiro, que contava com a participação importante do Estado e dos setores privados, estimulando a entrada de capital estrangeiro para aportar à estratégia política. Nesse período, a par de outros problemas que povoavam o universo político em questão, estavam o ritmo inflacionário

ascendente e o crescimento industrial, incompatível com a estrutura energética e de transportes existentes. Com isso, encaminhou-se de forma previsível uma grande crise energética que pôs em risco a linha desenvolvimentista traçada e programada pelo governo Vargas. Era a hora de investir na geração de energia, sob pena de um colapso.

E nos dias atuais, começa acontecer o mesmo colapso devido à falta de chuvas em todo país, denominando assim a crise hídrica brasileira.

A falta de chuvas tem conduzido o Brasil e, em particular, a região Sudeste, a uma situação difícil. A crise hídrica que estamos vivendo neste final de período úmido 2014/15 é inédita e traz sérias consequências econômicas e sociais. Em vários campos, como na geração de energia elétrica, no abastecimento das cidades, e na agricultura, vivem-se muitas dificuldades decorrentes da falta de chuvas.

Por esses motivos que a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), vem fazendo campanhas para o consumo consciente de energia elétrica, tanto em residências, escolas, setores públicos, como também no setor privado e indústrias.

No lado industrial é muito complicado economizar energia elétrica, por exemplo, para diminuir a quantidade de kW/h gastos mensalmente têm dois caminhos, a diminuição da produção e a baixa nos empregos, gerando assim um problema maior o prejuízo geral tanto industrial como social.

Segundo Dias, o consultor da Confederação Nacional das Indústrias (CNI):

As indústrias também podem reduzir o consumo e, conseqüentemente, a conta da energia, aumentando a eficiência de máquinas e equipamentos. É preciso analisar o custo benefício desses investimentos, mas essas iniciativas contam muitas vezes com apoio como financiamentos especiais. Entram nesse aspecto também outras medidas simples, como a instalação de sensores em áreas que não necessitam de iluminação constante e o treinamento dos funcionários. Pode parecer pouco, mas o simples ato de apagar as luzes de uma sala ao sair pode ajudar a reduzir o custo da energia. (FIEP, 2015).

## **2.2 Eficiência energética**

### **O que é Eficiência energética?**

A eficiência energética consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia. Como exemplo de ação, está a modernização de equipamentos e processos no sentido de reduzirem seu consumo. Os programas voltados para o consumo consciente também contribuem para a economia.

Costa (2013, p. 23), diz que:

Os pilares da sustentabilidade empresarial pressupõem que a empresa seja rentável e gere resultados econômico-financeiros, contribua para o desenvolvimento da sociedade e para a preservação do meio ambiente. Dessa forma, o bem estar social a preservação da natureza e os lucros são partes integrantes do negócio. O uso eficiente da energia, pela sua adequada aplicação e pela eliminação de desperdícios, está perfeitamente alinhado a esses pilares.

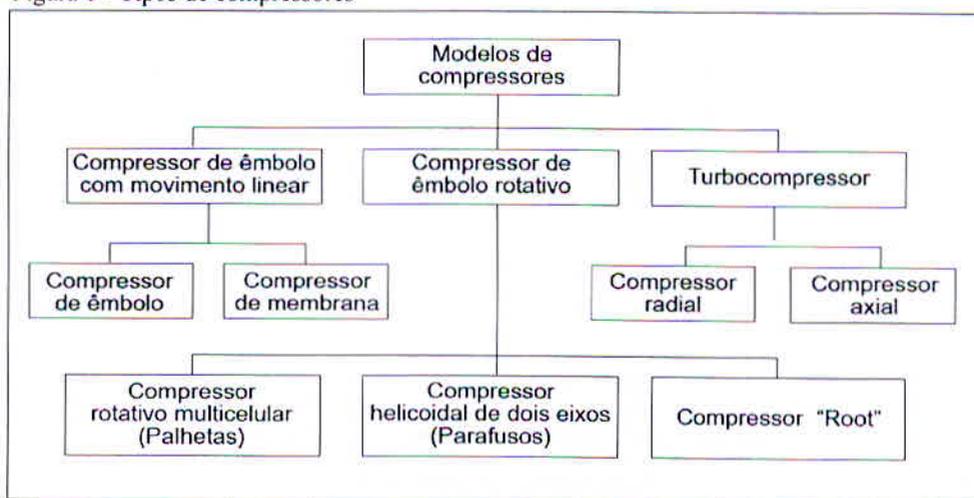
Boa parte da energia é empregada nos produtos que usamos especialmente os feitos de materiais como papel, alumínio, vidro e aço. Portanto, ações de reuso e reciclagem também economizam energia. Da mesma forma, a energia é utilizada no bombeamento da água, que, se poupada, diminui o consumo energético.

Para incentivar a eliminação de desperdícios, assim como reduzir os custos e os investimentos setoriais, foi criado em 1985 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel).

### 3 Compressor e ar comprimido

#### 3.1 Tipos construtivos de compressores

Figura 1 - Tipos de compressores



Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 55).

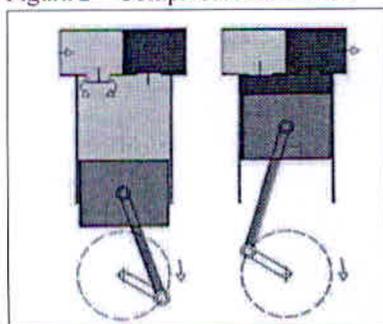
#### Compressor de êmbolo com movimento linear

Existem vários tipos de compressores, explicaremos alguns.

## Compressor de êmbolo

Atualmente, os compressores de êmbolo com movimento linear é o mais utilizado em pequenos estabelecimentos. Ele é apropriado não só para compressão a pressões baixas e médias, mas também para altas pressões. O campo de pressão varia de um bar até seis bar.

Figura 2 – Compressor de êmbolo



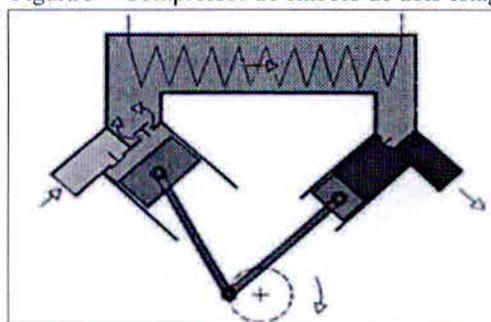
Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 56).

Para geração de compressão a pressões mais elevadas são necessários compressores de vários estágios. O ar aspirado será comprimido pelo primeiro êmbolo (pistão), refrigerado intermediariamente e novamente comprimido pelo próximo êmbolo. Na compressão a altas pressões faz-se necessária uma refrigeração intermediária, pois essa operação gera alto aquecimento. Os compressores de êmbolo e outros são fabricados em execuções a água ou a ar.

Os compressores de êmbolo com movimento linear apresentam grandes vantagens sobre as demais:

- a. Até 4 bar: um estágio;
- b. Até 15 bar: dois estágios;
- c. Acima de 15 bar: três ou mais estágios.

Figura 3 – Compressor de êmbolo de dois estágios

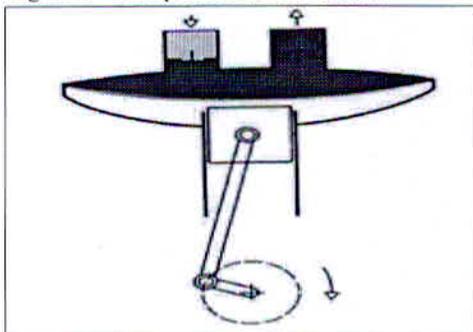


Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 57).

### Compressor de membrana (diafragma)

Esse tipo de compressor pertence ao grupo dos de êmbolo com movimento linear. Mediante uma membrana, o êmbolo fica separado da câmara de sucção e compressão, quer dizer, o ar não terá contato com as partes deslizantes. O ar, portanto, ficará sempre livre de resíduos de óleo.

Figura 4 - Compressor de membrana



Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 57).

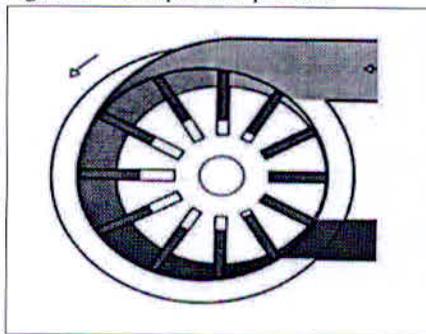
### Compressores de êmbolo rotativo

Neste tipo de compressor se estreitam (diminuem) os compartimentos, comprimindo, então, o ar nos mesmos.

### Compressor rotativo multicelular

Em um compartimento cilíndrico, com entrada e saída de aberturas, gira um rotor que fica alojado excêntricamente. Neste rotor existem rasgos, e dentro do mesmo há as palhetas que, em conjunto com a parede, formam pequenas divisões ou compartimentos (células). Quando em rotação, as palhetas serão, pela força centrífuga, expulsos ou apertados contra a parede. Devido ao eixo instalado excêntricamente de localização do rotor e há uma diminuição e um aumento das células.

Figura 5 – Compressor palhetas

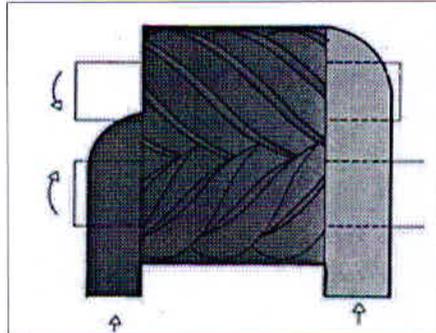


Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 58).

### Compressor helicoidal de dois eixos (duplo parafuso)

Neste tipo de compressor existem dois parafusos helicoidais, os quais, por terem perfil côncavo e convexo, comprimem o ar que se movimenta axialmente.

Figura 6 - Compressor de parafusos

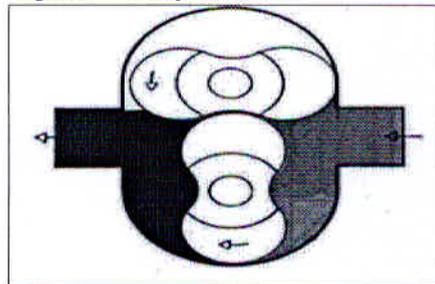


Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 59).

### Compressor Root

Nestes compressores o ar é transportado de um lado para o outro, sem alteração de volume. A compressão efetua-se no lado da descarga, ou seja, lado de alta pressão pelos cantos dos êmbolos.

Figura 7 – Compressor root

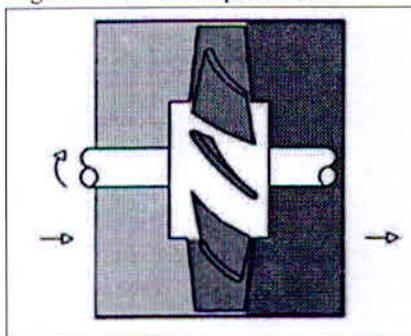


Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 59).

### Turbocompressores

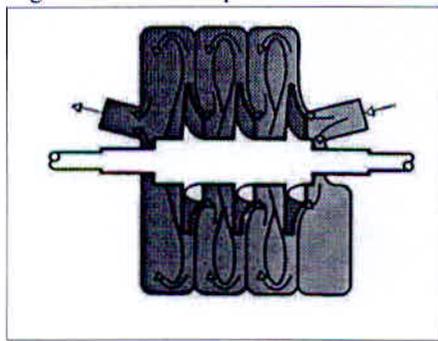
Estes compressores trabalham segundo o princípio de fluxo e são adequados para o fornecimento de grandes vazões. Os turbocompressores são construídos em duas versões: axial e radial. Em ambas as versões, o ar é colocado em movimento por uma ou mais turbinas, e a energia de movimento gerada é então transformada em energia de pressão.

Figura 8 - Turbocompressor axial



Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 60).

Figura 9 - Turbocompressor radial

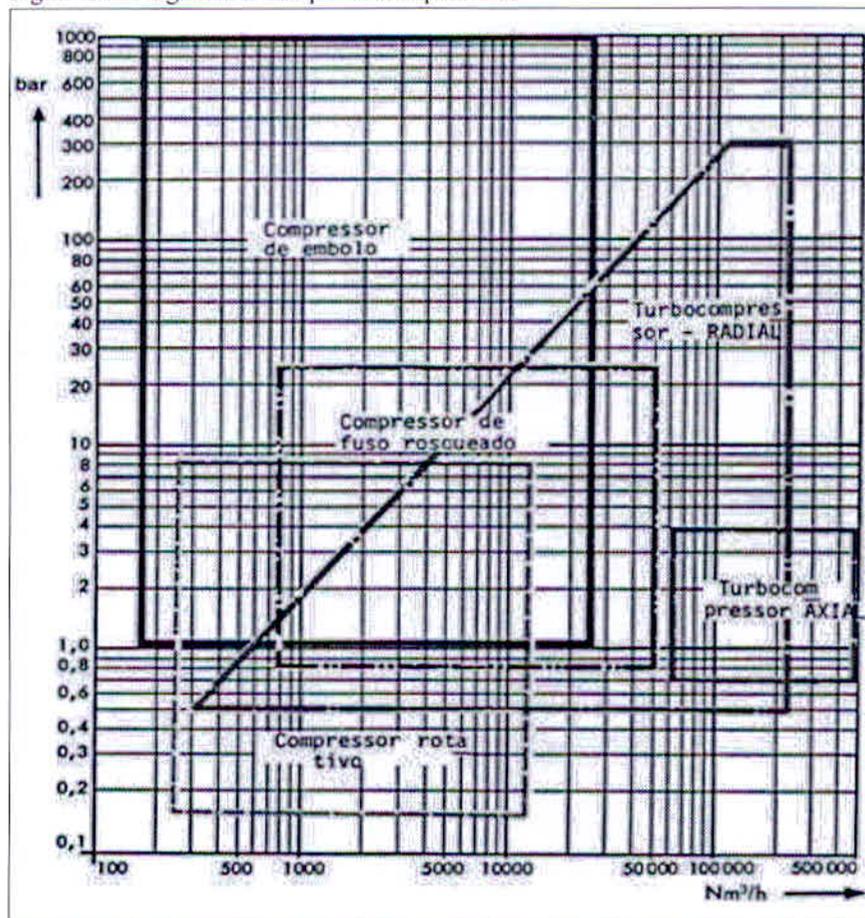


Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 60).

A compressão, neste tipo de compressor, processa-se pela aceleração do ar aspirado de câmara para câmara, em direção à saída. O ar é impelido axialmente para as paredes da câmara e, posteriormente, em direção ao eixo, e daí, no sentido radial, para outra câmara sucessivamente.

### 3.2 Diagrama de volume e pressão fornecidos

Figura 10 - Diagrama de seleção de compressores



Fonte: (ELETROBRÁS, 2009, p. 62).

### 4 Compressor GA 45 VSD

- A pressão sempre será constante;
- Por consequência, em ter uma pressão constante, o consumo de energia também será constante;
- A quantidade de ar que será admitida no compressor de acordo com a demanda de ar necessária;
- Quanto mais próximo for a demanda de ar, da capacidade do compressor, melhor será a eficiência energética;
- Mais eficiente que o sistema carga alívio para demandas de ar também abaixo de 90% da capacidade total do compressor.

### Por que se faz necessário o uso dessa tecnologia?

- A ideia do de utilizar a tecnologia VSD surgiu para ser uma diferença em relação ao consumo de energia;
- Não possui nenhum tipo de válvula de alívio, onde gera desgaste na mola;
- Mais confiável;
- Não necessita de reservatório, salvo em algumas aplicações em que uma grande quantidade de ar comprimido, maior que a capacidade do compressor, é consumida em pouco tempo.

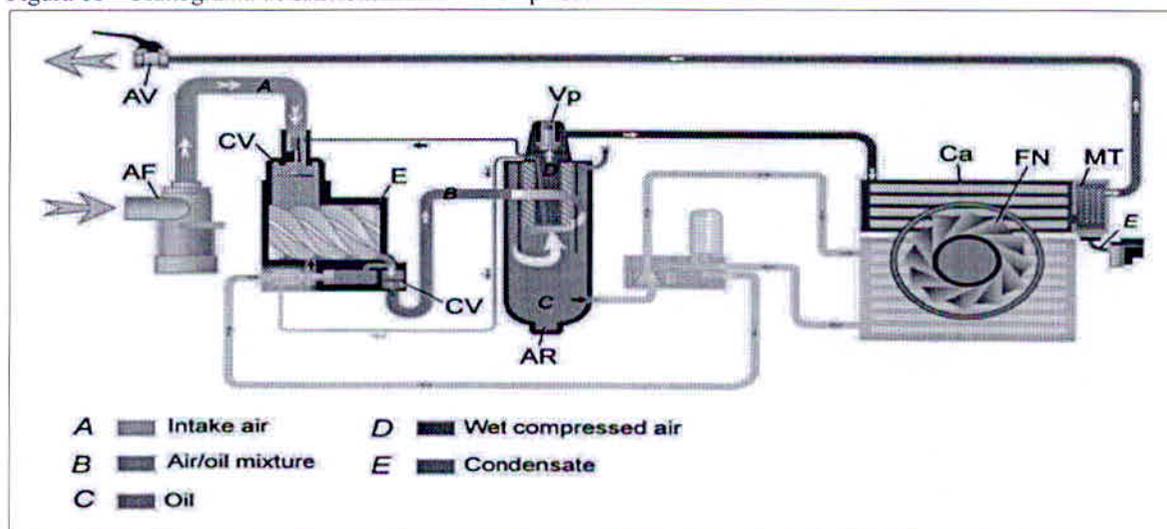
Os compressores GA 45 VSD são compressores de parafuso de um estágio e com injeção de óleo, acionados por um motor elétrico.

Os compressores estão alojados numa estrutura com isolamento acústico e estão disponíveis na versão resfriada a ar. Os compressores são controlados pelo regulador de frequência.

O módulo de controle eletrônico está instalado na porta do lado direito. Um compartimento elétrico, que contém fusíveis, transformadores, relés, etc., está localizado por trás deste painel.

A tecnologia integrada de acionamento de velocidade variável (VSD) espelha a utilização de ar, ajustando automaticamente a velocidade do motor, conforme a necessidade de ar comprimido.

Figura 11 – Fluxograma de funcionamento do compressor



Fonte: (Atlas Copco, 2009).

#### 4.1 Inversor de frequência – Economia de energia:

Variar a velocidade do motor elétrico, proporcionalmente ao consumo de ar comprimido, a fim de manter a melhor relação entre consumo e potência.

Os compressores da linha VSD utilizam:

- a. Inversores de frequência especialmente desenvolvidos para trabalhar com os compressores;
- b. O módulo eletrônico micro processado *Elektronikon*, através de seus sofisticados algoritmos, gerencia o funcionamento do inversor de frequência mantendo a pressão constante com o menor consumo de energia possível;
- c. A linha VSD pode trabalhar de 5,5 a 12,5 bar, sem haver necessidade de troca de nenhum componente do compressor, oferecendo muito mais flexibilidade. O *Elektronikon* oferece inúmeras ferramentas exclusivas para o gerenciamento do compressor VSD, tornando fácil e prático o dia a dia do usuário.
- d. Os componentes elétricos mantêm-se arrefecidos, o que melhora o tempo de vida útil dos mesmos. Acionamento dedicado para motores com tecnologia iPM. Dissipação do calor do inversor em um compartimento separado.

#### Frequência

Ciclo = Forma de onda completa que representa todos os seus valores.

Período (T) = Tempo para ocorrer um ciclo. (em segundo).

Frequência (f) = número de ciclos por segundo. (em Hertz: Hz)

#### 4.2 Compressor carga-alívio

- a. O mais usado em todo o mundo quando se fala em compressores de parafuso;
- b. É definida uma faixa de pressão para trabalho;
- c. Quando o compressor atinge uma pressão mínima estabelecida, o mesmo entra em “carga”, e assim gerando ar para a linha;
- d. Quando o compressor atinge uma pressão máxima estabelecida, entra em “alívio” mantendo – se pressurizado internamente, consumindo energia, porém sem gerar ar para a rede (trabalhando sem necessidade);
- e. Seu consumo de energia nunca será constante, pois existe variação de acordo com a necessidade de ar do usuário;

f. Quanto mais próximo for, a demanda de ar, da capacidade do compressor, melhor será a eficiência energética.

#### 4.2.1 Regulagem da válvula de admissão

Na produção de ar a regulagem de válvula de admissão é a forma mais comum de alívio do compressor. Nesse sistema utiliza-se um mecanismo que é chamado de garfo, onde mantém suas placas da válvula de admissão abertas sempre que não houver a necessidade de demanda de ar do equipamento. Com esta válvula de admissão mantida na posição aberta, o ar poderá se deslocar tanto para dentro como também para fora do cilindro e assim acompanhando o deslocamento do pistão.

Para que se realize o trabalho do mecanismo de alívio é necessário que exista uma pressão mínima. A potência consumida em alívio compreende a perda devido à fricção do ar e as perdas dos elementos mecânicos do equipamento.

#### **Estrangulamento da válvula de admissão**

Através de uma válvula de abertura variável na admissão existente no compressor pode-se regular o alívio, sendo assim, aumento da relação de compressão acaba sendo um inconveniente.

#### **Controle por desvio**

Esse método não controla diretamente a operação do compressor em si, porém permite que se trabalhe o tempo todo em carga, desviando o excesso de ar da descarga para a admissão. A potência consumida é igual aquela de plena carga. Há um resfriamento do ar quando esse é desviado para se evitar o aumento de temperatura devido à recompressão do ar recirculado.

#### **Controle de sopro para atmosfera**

No controle de sopro o compressor fica constantemente comprimindo, o ar descarregado é soprado para a atmosfera quando a pressão máxima é atingida. As regulagens por desvio e por sopro acabam sendo não viável economicamente, porque a potência necessária no eixo do compressor é a mesma que a plena carga.

### 4.3 Variação da velocidade do acionador

De acordo com a Revista Mecatrônica Atual (2013),

A vazão de ar comprimido do compressor é diretamente proporcional à velocidade do acionador/motor, desse modo, pode-se controlar a vazão de acordo com a demanda de ar. Esse método pode ser utilizado em compressores acionados por motores elétricos ou a combustão interna e apresenta uma grande vantagem que é a economia de energia, além da redução dos custos de manutenção e prolongamento da vida útil do equipamento.

#### 4.3.1 Vantagens e desvantagens do uso do compressor de VSD / Carga e alívio

##### **Vantagens:**

- a. Economia de garantida de 38% a 50% energia elétrica;
- b. Eliminação completa do consumo de energia em alívio;
- c. Aumento da vida útil do equipamento;
- d. Não há limite de partidas para o motor elétrico;
- e. Fácil implantação;
- f. Menor “stress” nos componentes elétricos;
- g. Baixo custo de implantação, pois o retorno do investimento é em pequeno prazo;
- h. Produz somente a necessidade da demanda;
- i. Fácil programação de funcionamento;
- j. Faixa de pressão constante com tolerância de 0,1;
- k. Gerando melhor controle do processo;
- l. Diminuição das perdas por vazamento;
- m. Fator de potência ( $\cos \varphi$ ) acima de 95%;
- n. Só trabalha em carga;
- o. Sem picos de corrente ao partir;
- p. Partida/parada em tempo controlado de aceleração / desaceleração.

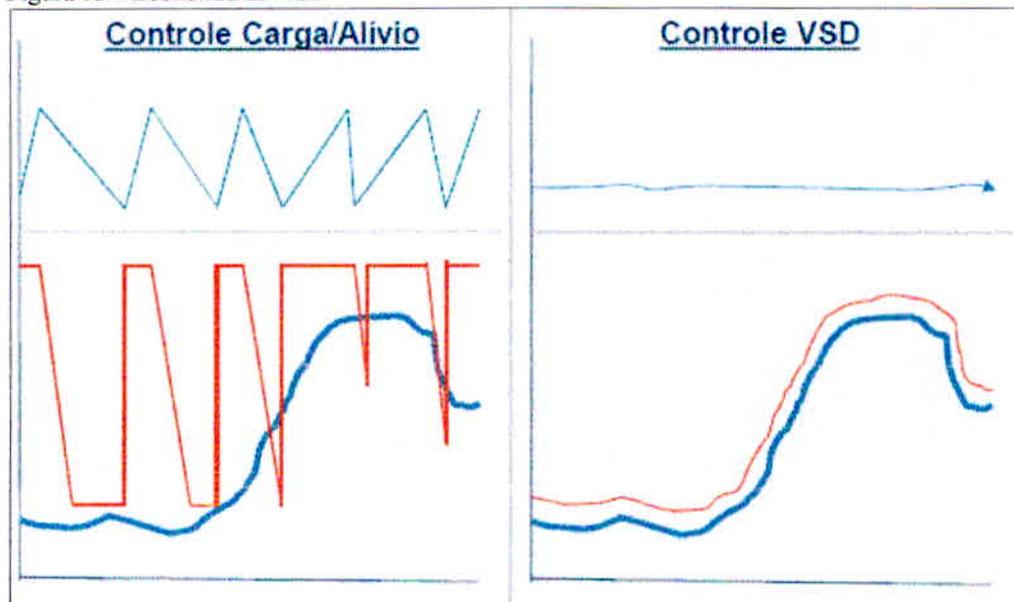
##### **Desvantagem:**

Manutenção tem que ser especializada e é mais cara.

#### 4.4 Estudos fornecidos pelos catálogos do fabricante

##### Carga/Alívio em comparação ao Inversor de frequência

Figura 12 – Economia do VSD



Fonte: (ATLAS Copco, 2009, p. 39)

- Pressão de operação
- Energia consumida
- Volume de ar usado

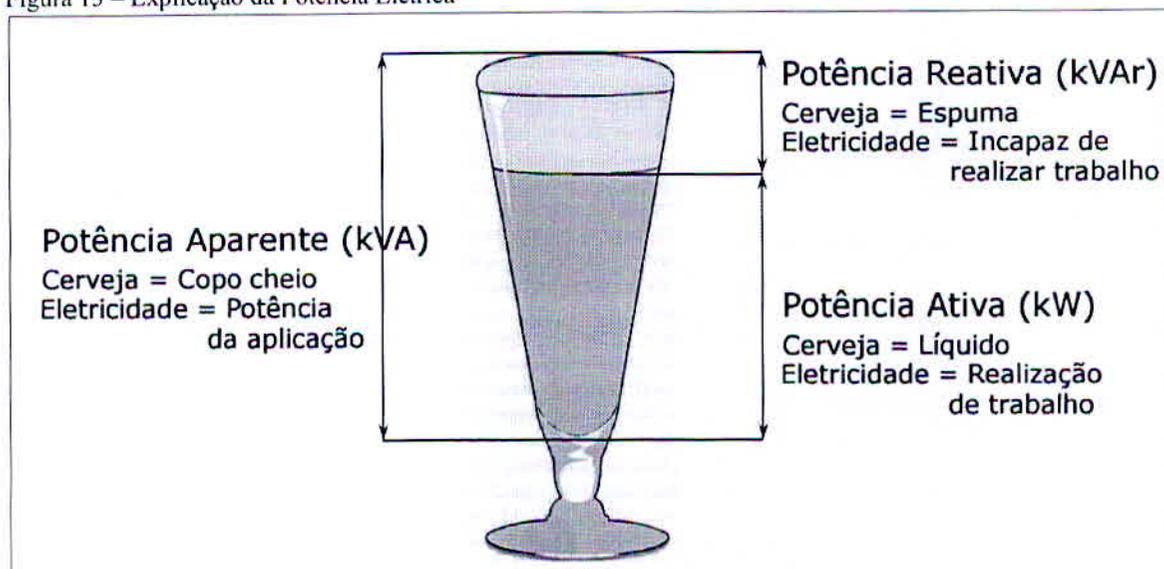
No gráfico Controle Carga/Alívio acima mostra uma correlação entre Pressão de operação/ Consumo de energia/ Volume usado. A pressão de operação e o consumo de energia variam muito, quando aumenta o volume de ar usado.

A pressão de operação quando não estável, contribui para o péssimo fluxo do ar, tanto nas tubulações quanto no reservatório, tornando assim uma menor vida útil dos mesmos e o mais importante, a variação de pressão no processo produtivo da empresa. A energia consumida quando não estável, ajuda a aumentar o fator de potência da empresa.

Porém no segundo gráfico pode se observar o contrário com a correlação, pois a pressão de operação não há variação, o consumo de energia acompanha a demanda do processo do volume de ar consumido.

#### 4.4.1 Potência elétrica

Figura 13 – Explicação da Potência Elétrica



Fonte: (Atlas Copco, 2009, p. 12)

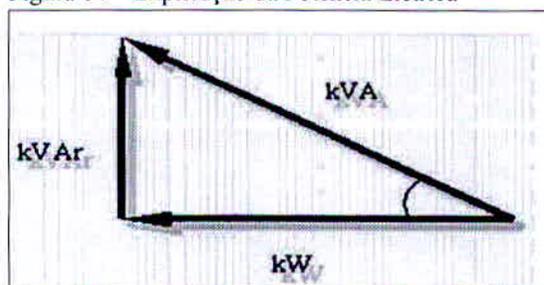
kVA = Preço Cheio

kW = Custo para realização do trabalho

kVAr = Custo sem retorno

#### Triângulo da potência

Figura 14 – Explicação da Potência Elétrica



Fonte: (Atlas Copco, 2009, p. 13).

$$S = \sqrt{3} \times U \times I$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

$$P = S \times \cos \varphi$$

$$Q = S \times \sin \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Onde,

S = Potência Aparente

P = Potência Ativa

Q = Potência Reativa

$\cos \phi$  = Fator de Potência

Exemplo

$\cos \phi = 0,95$ , 500 kW, 220V, Trifásico

$$I = \frac{S}{V \times \sqrt{3}}$$

$$I = \frac{S}{220 \times \sqrt{3}}$$

$I = 1381,22 \text{ [A]}$
---------------------------

$$I = \frac{\frac{500kW}{0,95}}{220 \times \sqrt{3}}$$

#### 4.4.2 Entendendo o que trata no chamado fator de potência

##### Principais consequências de um baixo fator de potência:

- Acréscimo na conta de energia elétrica devido estar operando/trabalhando com baixo fator de potência no equipamento;
- Existem limitações da capacidade dos transformadores de alimentação;
- Quedas e flutuações de tensão nos circuitos de distribuição de energia;
- Sobrecarga nos equipamentos de manobra reduzindo sua vida útil;
- Aumento das perdas elétricas na linha de distribuição pelo efeito Joule;

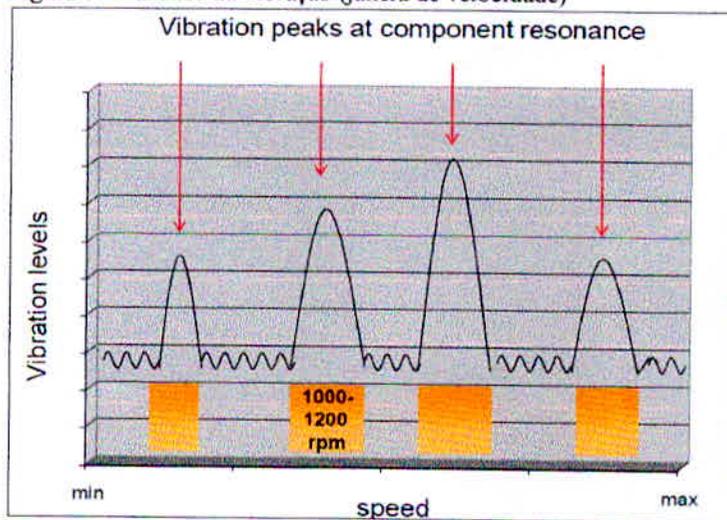
- f. Há necessidade de aumento do diâmetro dos condutores;
- g. Necessidade de aumento da capacidade dos equipamentos de manobra e proteção.

#### Causas do baixo fator de potência

- a. Motores de indução trabalhando a vazio (sem necessidade);
- b. Transformadores trabalhando a vazio (sem necessidade) ou com pouca carga;
- c. Reatores de baixo fator de potência no sistema de iluminação;
- d. Fornos de indução ou a arco;
- e. Máquinas de tratamento térmico;
- f. Máquinas de solda;
- g. Nível de tensão acima do valor nominal provocando um aumento de consumo de energia reativa.

#### 4.5 Janela de Velocidade

Figura 15 – análise da vibração (janela de velocidade)



Fonte: (ATLAS Copco, 2009, p. 28).

- Aumento da frequência de ressonância em determinadas velocidades.

#### Os compressores com tecnologia VSD não está sujeito às janelas de velocidades

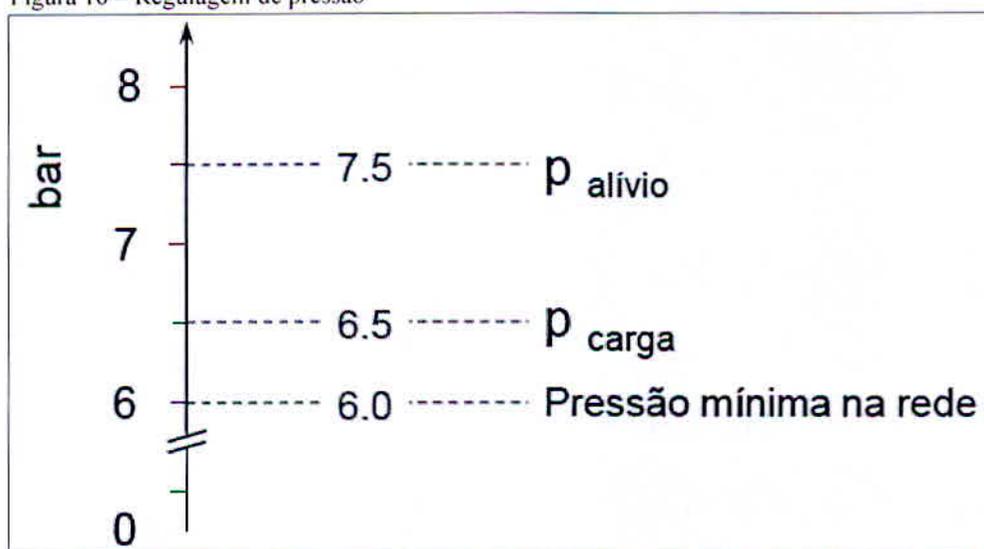
Benefícios de não usar as Janelas de Velocidades

O resumo das principais vantagens de uma operação sem janelas de velocidade são:

- a. Maior vida útil
- b. Pressão Constante
- c. Melhor ajuste à aplicação

## 4.6 Economias Indiretas

Figura 16 – Regulagem de pressão



Fonte: (ATLAS Copco, 2009, p. 36).

- Grandes diferenciais de regulagem de pressão causam aumento de consumo;
- Cada 1 bar de pressão adicional representa 6% de aumento no consumo de energia;
- O GA VSD proporciona a utilização do menor diferencial possível, minimizando ainda os vazamentos;
- Com os compressores VSD consegue-se regulagem de pressão de até 0,1 bar.

### 4.6.1 Economia de energia segundo cálculos teórico do fabricante

Consumo de energia de um compressor, com rotação constante da seguinte maneira:

- Considera a potência à plena carga ( $P_F$ );
- Tomar a potência do compressor em alívio ( $P_N$ );
- Considerar que a carga do compressor seja igual a 0,7 (70% em carga).

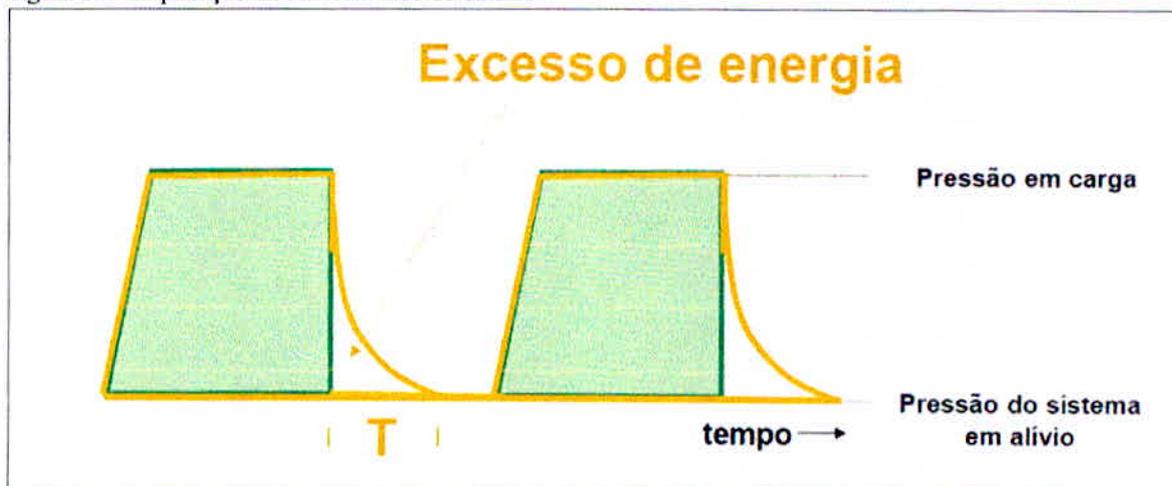
Então calcula-se a potência da seguinte forma:

$$0,7 \times P_F + 0,3 \times P_N = \text{Potência Média}$$

Isso dará um resultado Sub Estimado.

#### 4.6.2 Sub Estimado

Figura 17 – Explicação da Sub estimado do cálculo



Fonte: (ATLAS Copco, 2009, p. 48).

■ Teórico

■ Real

T - Tempo para alívio completo do sistema

#### 4.7 Redução financeira no consumo de energia

Os estudos mostram a oportunidade de avaliar uma instalação de ar comprimido existente e oferecer sugestões de economia de energia para melhoria do seu sistema, feito em uma empresa do segmento de eletrônicos.

Visando reduzir o custo com energia elétrica, esta empresa decidiu investir em um equipamento mais avançado tecnologicamente. Esses estudos foram feitos por um software.

O software Atlas Copco Measurement Box foi usado para gerar dados no perfil da instalação de ar comprimido. A medida foi realizada de 13/02/2013 (Quarta-Feira) a 20/02/2013 (Quarta-Feira).

Usando o perfil mensurado, foi calculado o custo total de energia elétrica para funcionamento do sistema de ar comprimido no período de um ano, considerando 52 semanas por ano, sete dias por semana e 24 horas por dia (8.736 h/ano). Foi incluída uma sugestão de melhoria para a instalação atual verificando a economia anual, considerando 1 kWh = R\$ 0,30.

#### 4.7.1 Objetivos

- Determinar a demanda de ar comprimido da instalação bem como o consumo de energia elétrica relacionado à mesma.
- Emitir gráficos da demanda de ar comprimido durante o período de medição, sendo este de uma semana.
- Estabelecer relação entre a capacidade de geração, instalação e a demanda, determinando a eficiência e a confiabilidade do sistema.

#### 4.7.2 Metodologia

A caixa de medição instalada nesse período de oito dias monitorou a corrente elétrica consumida pelo compressor enquanto o mesmo estava em funcionamento, estando em carga, em alívio ou parado.

Os dados adquiridos através de um software, medidor de corrente elétrica a partir de um campo eletromagnético, são enviados a um programa de cálculo e simulação, relatando, portanto, variáveis como energia elétrica consumida, o número de horas trabalhadas, o número de ciclos carga – alívio, entre outras.

Quadro 1 - Dados do sistema instalado

<b>Informações dos Compressores</b>	<b>GA-75.100FF Série: 992.409</b>	<b>Total do Sistema</b>
FAD. Nominal (l/s)	219	219
Pot. em Alívio (kW)	---	---
Pot. em Carga (kW)	---	---
Pres. em Alívio (bar)	---	---
Pres. em Carga (bar)	---	---
Pres. Setpoint (bar)	7	7
Parada indireta (bar)	---	---

Fonte: o autor.

Quadro 2 - Dados calculados do sistema instalado

Tempo em Carga (h)	41,70	41,70
Tempo em Alívio (h)	126,30	126,30
Tempo em Parada (h)	0,00	0,00
Ciclos Carga/Alívio	5.909	5.909
Energia em Carga (kWh)	3.973	3.973
Energia em Alívio (kWh)	7.387	7.387
Total Energ. Cons. (kWh)	11.360	11.360
Energia Consumida (R\$)*	3.408,00	3.408,00

Fonte: o autor.

\* Considerando o intervalo do estudo de 5 dia a um custo de energia elétrica de R\$ 0,30

\*\* Considerando 365 dias por ano

Quadro 3 - Dados de energia consumida na semana analisada

Dados calculados	Sistema	Porcentagem
<b>Energia em Carga (kWh)</b>	3.973	34,97 %
<b>Energia em Alívio (kWh)</b>	<b>7.387</b>	<b>65,03 %</b>
<b>Energia Total (kWh)</b>	11.360	100 %

Fonte: o autor.

#### 4.7.3 Eficiência

Entende-se por um sistema eficiente aquele que, apresentando compressores do tipo carga-alívio, apresenta um consumo de energia em alívio de até 10 % do consumo total de energia.

O sistema analisado apresentou um consumo de energia em alívio por volta de 65,03% da energia total, representando 7387 kW/h por 168 horas trabalhadas.

O compressor quando está em alívio, consome cerca de 50 % da potência nominal do motor, sem que haja produção de ar comprimido.

#### 4.7.4 Confiabilidade

Entende-se por um sistema confiável aquele que apresenta pelo menos um compressor de stand by, possibilitando que a planta opere em possível parada do compressor. Neste aspecto o sistema está bem dimensionado.

### 4.8 Instalação Simulada

Foi feita uma simulação considerando a substituição de um compressor de Carga – alívio por um compressor com inversor de frequência.

Quadro 4 - Dados calculados do sistema simulado

Informações dos Compressores	GA 45 VSD FF	Total do Sistema
FAD. Nominal (l/s)	de 25 a 143	143
Pot. em Alívio (kW)	---	---
Pot. em Carga (kW)	---	---
Pres. em Alívio (bar)	---	---
Pres. em Carga (bar)	---	---
Pres. Setpoint (bar)	7	---
Parada indireta (bar)	7.3	---

Fonte: o autor.

Tabela 5 - Dados calculados do sistema simulado em valores

Compressores	GA 45 VSD FF	Total do Sistema
Tempo em Carga (h)	168,00	168,00
Tempo em Alívio (h)	---	0,00
Tempo em Parada (h)	0,00	0,00
Ciclos Carga/Alívio	3,00	3,00
Energia em Carga (kWh)	3.694	3.694
Energia em Alívio (kWh)	---	0,00
Total Energ. Cons. (kWh)	3.694	3.694
Energia Consumida (R\$)*	1.108,20	1.108,20

Fonte: o autor.

\*Considerando o intervalo do estudo de 7 dias a um custo de energia elétrica de R\$ 0,00

\*\*Considerando 365 dias por ano

Quadro 6 -Dados de energia consumida no sistema simulado

Dados calculados	Sistema	Porcentagem
<b>Energia em Carga (kWh)</b>	3.694	100 %
<b>Energia em Alívio (kWh)</b>	0	0 %
<b>Energia Total (kWh)</b>	3.694	100 %

Fonte: o autor.

#### 4.8.1 Eficiência

Entende-se por um sistema eficiente aquele que, apresentando compressores do tipo carga-alívio, apresenta um consumo de energia em alívio de até 10 % do consumo total de energia.

O sistema simulado apresentou um consumo de energia em alívio nulo em relação à energia total, pois o compressor com inversor de frequência não apresenta energia consumida em alívio.

#### 4.8.2 Confiabilidade

Neste aspecto o sistema estará bem dimensionado. Nesta planta com 1 (um) compressor operando, é recomendável manter 1 (um) compressor em stand-by.

**Obs.:** Nesta planta havia 3 compressores de carga-alívio.

#### 4.9 Resultados da simulação de um compressor com inversor de frequência

- Dados de energia consumida nos sistemas de compressores de carga-alívio e simulado com inversor de frequência.

Quadro 7 – Comparação

Dados calculados	Atual	Simulado
<b>Energia Consumida Anual (kWh)</b>	590.720	192.088
<b>Horas de Operação Analisadas (h)*</b>	8736	8736
<b>Custo com Energia Anual (R\$) **</b>	<b>177.216,00</b>	<b>57.626,40</b>

Fonte: o autor.

\*Período analisado – Um ano – 8736 horas (24 horas/dia – 7 dias/semanas – 52 semanas/anos)

\*\*Considerando 1 kW/h = R\$ 0,30

**Obs.:** Os dados mensurados foram extrapolados para o período de um ano, considerando que o perfil de consumo de ar comprimido se mantenha conforme o avaliado.

#### Conclusão do estudo

Observa-se um consumo de ar comprimido máximo na ordem de 120 l/s, porém este valor se dá em vários períodos de tempo, são picos de consumo.

A vazão total fornecida pelos compressores é de 219 l/s. O consumo médio de ar comprimido está em torno de 70 l/s, e o consumo mínimo é de 25 l/s. De acordo com os gráficos analisados, verifica-se um perfil de consumo bastante variável.

A configuração atual não se encontra otimizada, pois o compressor instalado apresenta um consumo de energia em alívio em torno de 65,03% do consumo de energia total, totalizando 384.124 kW/h anuais.

### **Compressor com inversor de frequência**

Foi avaliada a substituição do compressor (Carga - alívio) em operação por um compressor com inversor de frequência no sistema, capaz de suprir a demanda de acordo com a real necessidade, variando a rotação do elemento compressor para suprir a real demanda de ar comprimido instantaneamente.

Levando em consideração o custo de 1 kW/h = R\$ 0,30, e o equipamento operando 8.760 horas em regime contínuo, tem-se que o custo anual com energia elétrica do sistema atual é de **R\$ 177.216,00**.

O custo anual com energia elétrica com o sistema simulado será de **R\$ 57.626,40**, em regime contínuo, considerando o perfil de consumo avaliado.

A economia com energia elétrica anual possível com a aquisição do compressor proposto (GA 45 VSDFE) no sistema é de **R\$ 119.589,60**.

**Valor do investimento: R\$ 144.000** (Máquina, Mão de obra, Contingências).

Por tanto, o investimento se auto paga em apenas 1 ano e 3 meses. Isto para uma organização é pouco tempo e retorno rápido.

### **Benefício ao Meio Ambiente.**

Sinergia com o meio ambiente. Redução da emissão de 90,3 (t CO<sub>2</sub>) que corresponde a 42 árvores por ano que deixarão de ser derrubadas.

## **5 METODOLOGIA**

Foi realizado um estudo baseado em uma empresa que fabrica componentes eletrônicos como: reatores para lâmpadas fluorescentes e luminárias de led. Empresas que fez essa troca de equipamentos, mostrando índices e gráficos comprovando que esses estudos têm fundamentos tanto científico como financeiro e também pesquisas abordando manuais e catálogo de fabricante. Que especifica bem o assunto a ser pesquisado.

## 6 CONCLUSÃO

A partir dos conceitos explicitados acima, é possível concluir que baseado em estudos e aplicação feita em uma fábrica do seguimento eletrônico na cidade de Varginha-MG, que a troca do compressor tipo Carga-alívio por um compressor equipando com inversor de frequência, trás um benefício tanto para a empresa que utilizar dessa troca quanto ao meio ambiente, como também, a questão sustentável que as empresas tanto defendem. Sendo os seguintes benefícios voltados para a empresa ou fábrica que foi apresentado nesta pesquisa, como: Redução do gasto de energia elétrica em 38% a 50% segundo o fabricante e podendo ser maior dependendo do tipo de processo fabril; redução da manutenção do equipamento gerador de ar comprimido devido ele só trabalhar em carga; junto com a redução do gasto de energia vem também a questão financeira do produto adquirido, pois devido à queda do consumo de energia o equipamento se auto paga em pouco menos de um ano e três meses e depois nesse período a empresa terá uma redução real nas contas de energia a pagar a concessionária de 67%, podendo assim investir em outros compressores. Pelo lado ambiental pode-se mostrar que existe sim, uma alternativa para a redução no consumo da energia elétrica sem diminuir a o processo de fabricação. E o ponto importante para o lado ambiental é se todos os diretores de fábricas e empresas pensarem nesse método a produção de energia iria cair drasticamente e assim não ficariam dependendo de geração de energia não renováveis como as termoelétricas.

## 7 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Uso indevido de energia elétrica**. Brasília: 2013. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Cartilha\\_uso\\_indevido\\_energia.pdf/](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Cartilha_uso_indevido_energia.pdf/)>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

ATLAS Copco. **Compressores com inversor de Frequência Atlas Copco**. Disponível em: <<http://www.mrcompressoresdeparafuso.com.br/catalogos-tecnicos/vsd---variador-de-velocidade--inversor-de-freuencia-beneficios-3-6.pdf/>>. Acesso em: 08 de out. de 2015.

\_\_\_\_\_. **Publications – Atlas Copco Industrial Technique AB**. Disponível em: <<http://www.atlascopco.com.br/brbr/products/links/>>. Acesso em: 09 de out 2015.

BOLETIM da Indústria. **Medidas podem ajudar a indústria a economizar até 25% na tarifa de energia elétrica**. Paraná: 2015. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/boletimsindical/sindemon/News16905content256444.shtml/>>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

BRAGA, Benedito. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005.

CERQUEIRA, Gustavo Aouar. et al. **A Crise Hídrica e suas Consequências**. Brasília: 2015. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/boletins-legislativos/bol27/>>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

COSTA, Mauro Cesar Maggioni. **Gestão eficiente de energia**. Belo Horizonte: SEBRAE/MG, 2013.

ELETROBRÁS, **Compressores Guia básico**. 2009. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/JoaoLopes39/compressores-48118207/>>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

FRAGOMENI, Claudia. **O impacto no meio ambiente pela atividade da geração de energia elétrica pelo uso de recursos hídricos**. 2009. Disponível em:

<<http://www.upf.br/seer/index.php/rjd/article/viewFile/2132/1372/>>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011.

REIS, Lineu Belico dos. et al. **Energia, recursos naturais e a prática de desenvolvimento sustentável** Elaine A. Amaral Fadigas, Cláudio Elias Carvalho. Barueri: Manole, 2005.

REVISTA Mecatrônica atual. **Aplicação de conversores de frequência em compressores**. São Paulo: 2013. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/970-aplicao-de-conversores-de-freqncia-em-compressores/>>. Acesso em: 09 de out. de 2015.

ROLLINS, John P. **Manual do ar comprimido e gases**. Tradução Bruno Buck. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.