



ESTUDO DOS IMPACTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DA ATUALIZAÇÃO DE COMPRESSORES EM UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA

WylDES Nunes¹

André Abelardo TAVARES²

Resumo: Este trabalho tem o intuito de mostrar os impactos técnicos e econômicos da substituição do compressor em um sistema de ar comprimido em uma indústria metalúrgica. É apresentada a análise do consumo de energia elétrica do equipamento antigo e do novo, verificando as reais possibilidades de redução de desperdícios e priorizando a eficiência energética. São abordados os pontos críticos do sistema que consomem mais energia e os que geram maiores perdas. Apresentam-se os métodos utilizados para quantificar os vazamentos, as possibilidades de melhoria do sistema com a comparação do sistema antigo, e os valores dos ganhos econômicos e de energia com a análise da viabilidade das alterações.

Palavras – chave: Eficiência energética. Compressor. Desperdício.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de estudos e projetos na área de eficiência energética, tem a tendência de aumentar de forma significativa conforme os recursos naturais vão se tornando mais escassos e problemáticos do ponto de vista ambiental ou econômico. A competitividade do mercado energético estimula que as concessionárias de energia reduzam seus custos através da eficiência, o que aumenta os investimentos nessa área, e favorece a criação de programas e incentivos para manter determinados clientes. Também estimula as empresas privadas que atuam na área a aumentar seus investimentos.

A gestão de energia e a aplicação de programas de eficiência energética indicam um caminho em franca expansão e muito promissor para ser aplicado desde as grandes, como as pequenas indústrias, chegando até às residências.

A sociedade é movida pela energia extraída de recursos naturais renováveis, ou não, e uma das formas mais interessantes de lidar com os problemas causados pela geração, é consumir menos energia, executando o mesmo processo por meio de medidas de correção e atualização de instalações elétricas.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica, Faculdade Satc. E-mail: wylDES_@hotmail.com

² Professor Faculdade Satc. Email: andre.tavares@satc.edu.br



A otimização do uso de energia elétrica pode ser aplicada de diversas formas, tanto de forma geral ou apenas abordando pontos específicos, geralmente mais críticos em processos específicos da empresa. A avaliação do método utilizado depende do valor dos investimentos disponíveis, o retorno estimado e especificidades de cada tipo de indústria, por isso, cada projeto deve ser analisado individualmente diante de cada problema específico.

Este trabalho expõe a situação da instalação elétrica de uma empresa metalúrgica, efetuando um estudo sobre o sistema pneumático utilizado e destacando possíveis melhorias. O estudo sobre o tema tem importância fundamental para se obter informações relativas ao gerenciamento dos custos de energia e a racionalização de seu uso, verificando os pontos de desperdício e a eficiência dos equipamentos, pois o sistema pneumático é muito utilizado nas indústrias devido a sua flexibilidade e simplicidade, mas também é um processo que apresenta baixa eficiência e, muitas vezes, grandes desperdícios.

A maioria dos compressores utilizados são acionados por motores elétricos, logo há uma relação direta entre o ar comprimido utilizado e a energia consumida. Medidas como atualização ou troca de equipamento, instalação de outros processos de partida e mitigação dos vazamentos podem oferecer uma boa oportunidade de economia financeira e de energia elétrica. Nesse trabalho é apresentado a comparação da troca de um compressor antigo por um novo e os resultados obtidos, além de sugestões de possíveis melhorias futuras.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e econômica para otimização de um sistema de ar comprimido de uma indústria metalúrgica.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar o sistema pneumático da indústria;
- Realizar a medição do consumo de energia dos compressores;
- Analisar as possibilidades de economia de energia;
- Comparar a situação após a implementação do compressor novo; e
- Levantar os custos financeiros envolvidos.



2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desperdício que ocorre em uma indústria, provém, desde erros de projeto, mau dimensionamento de cabos e equipamentos, falha entre conexões, adição de novas cargas e manutenção preventiva inexistente ou ineficiente, como exemplo, a divisão incorreta dos circuitos e o desequilíbrio entre fases, o que gera pontos de desperdício [1].

2.1 INDÚSTRIA METALÚRGICA

O conceito de indústrias metalúrgicas é muito amplo, nela estão envolvidos serviços industriais, fabricação de equipamentos, montagem de componentes, fundição, entre outros [2].

As indústrias metalúrgicas são responsáveis pelos processos de transformação de matérias-primas, derivadas principalmente da mineração, em produtos novos. Abrangem desde pequenas indústrias que transformam metais e fundição de minérios metálicos até aplicações especializadas no segmento automobilístico e materiais para plataformas de petróleo [2].

2.1 CONSUMO DE ENERGIA NAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS

O setor industrial tem grande influência no consumo de energia no país e é também um indicador de como está a sua situação econômica, visto que, um aumento no consumo, pode ser um indicador de crescimento. O consumo de energia elétrica nas indústrias nacionais foi de 164.556 GWh no ano de 2016, sendo que 23% foram utilizados pelas indústrias metalúrgicas, principal segmento de demanda industrial de eletricidade [3].

A evolução dos consumos residenciais, industriais e comerciais dos últimos anos pode ser acompanhado na Tab. 1, são apresentados os dados de uma década, para análise do crescimento no período e entendimento do contexto da situação atual [3].

Tab. 1: Consumo de energia elétrica por classe nacional, adaptado [4]

CONSUMO (GWh)	2006	2013	2016
BRASIL	356.129	463.142	460.827
RESIDENCIAL	85.784	124.908	132.872
INDUSTRIAL	163.180	184.685	164.556
COMERCIAL	55.369	83.704	87.873
OUTROS	51.796	69.846	75.526

Fonte: [4]

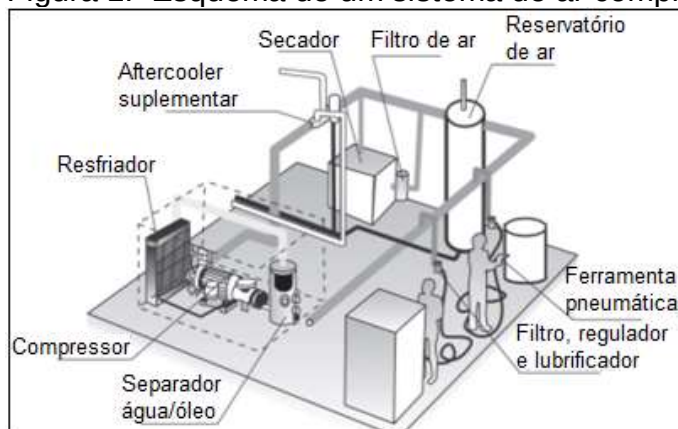
É possível perceber que o consumo industrial atingiu um pico em 2013, mas retornou ao nível de 2006 em 2016 devido a fatores econômicos. O consumo total atual aumentou devido aos setores residencial e comercial mas a disponibilidade de energia é um fator crítico para o crescimento das indústrias no país [3].

3 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Os sistemas de ar comprimido são utilizados na indústria como um condutor de energia, tal como os sistemas hidráulicos e a energia elétrica. Eles podem ser subdivididos em sistemas de geração, distribuição e uso final, e a Fig. 1 mostra um esquema simplificado de seus componentes. Cada um desses pontos permitem ganhos de eficiência energética, que possibilitam a análise das perdas e as soluções mais viáveis em cada sistema específico [5].

O uso final é a aplicação do ar comprimido nas ferramentas pneumáticas, válvulas, sistemas de controle e em outras várias aplicações diferentes [5]. Um sistema pneumático bem dimensionado é importante para assegurar que os equipamentos de uso final utilizem o máximo possível de sua eficiência para evitar desperdício de energia e aumentar a vida útil dos equipamentos [6].

Figura 1: Esquema de um sistema de ar comprimido completo



Fonte: [5]

Para o correto dimensionamento, deve-se considerar possíveis expansões no sistema para proporcionar a entrega do ar com vazão e pressão para os equipamentos designados. O compressor adequado deve ser escolhido segundo a sua aplicação específica, de acordo com sua capacidade de vazão, pressão de descarga (P_2 max) e a relação de compressão (P_2/P_1 máx.), conforme a Tab. 2. Elas estão relacionadas diretamente às limitações construtivas dos tipos de compressores [6; 7].

Tabela 2: Faixa de aplicação dos compressores, adaptado [5]

Compressor	Vazão Aspirada (m ³ /min)	P_2 máx. (bar)	P_2/P_1 máx.
Alternativo	Até 250	2.500 ou +	4,0 (por cilindro)
Palhetas	2 a 80	9	4,0 (por carcaça)
Parafusos	10 a 700	45	4,0 (por carcaça)
Centrífugos	50 a 2.800	700	10,0 (por carcaça de múltiplos estágios)
Axiais	1.500 a 25.000	10	6,0 (por carcaça de múltiplos estágios)

Fonte: [5]

A vazão corresponde à taxa de escoamento do fluido, ou seja, trata-se do volume de ar por hora que pode ser consumido por todos os equipamento da rede ligados simultaneamente [7].

O dimensionamento das tubulações da alimentação e das linhas específicas pode ser obtido através da Eq. (1) [8]:

$$d = 10 \left[5 \sqrt{\frac{1,663785 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{1,85} \cdot L_t}{\Delta P \cdot P}} \right] \quad (1)$$

Onde:

d = Diâmetro interno da tubulação em mm;

Q = Volume de ar corrente (Vazão total + futuras ampliações), em m³/h;

Lt = Comprimento total da linha, em m;

ΔP = Queda de pressão admitida, em kgf/cm²; e

P = Pressão de regime, em kgf/cm².

As perdas com a geração estão relacionadas com o comportamento ideal do compressor, seu rendimento termodinâmico e mecânico. Existem outras variáveis que afetam a eficiência desse equipamento [5]:

- Temperatura do ar aspirado, quanto menor, mais eficiente;
- Sujeira no filtro de aspiração, umidade e poeiras;
- Perdas devido ao trabalho com pressão muito elevada; e
- Melhorias no sistema de controle dos compressores.

Sistema que necessitam da pressão em torno de 6 a 7 bar podem ter um consumo de potência do motor de 6% a 10% maior para cada acréscimo de 1 bar na regulação inicial no ajuste do sensor de pressão do controle carga/alívio do compressor [5].

Para o sistema de distribuição, outras oportunidades devem ser observadas, como perdas de carga na tubulação e um ponto crítico em grande parte dos sistemas pneumáticos: as perdas devido a vazamentos no sistema [5].

Os vazamentos podem ser quantificados de maneira prática através da Eq. (2) [5]:

$$Q_{vaz} = Q_{comp} * \frac{(t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)}{T} \quad (2)$$

Onde:

Q_{comp} = Capacidade nominal de produção do compressor usado no teste (m^3/min);

T = Tempo total de alívio + compressão registrado no primeiro cronômetro (min);

Q_{vaz} = Vazão atribuída vazamentos (m^3/min); e

t = Tempos do compressor em carga registrado no segundo cronômetro.

A obtenção dos dados ocorre através de um método de registro de tempo por dois cronômetros, em que todos os equipamento necessitam estar conectados à rede, mas fora de uso. Primeiro, o compressor em teste deve ser colocado em carga até atingir o valor de desarme. Após isso, o primeiro cronômetro é acionado, no momento em que a pressão cair e o compressor entrar em carga, o outro cronômetro tem que ser acionado e desligado quando a pressão de desligamento for atingida. Para maior precisão nos dados, esse procedimento deve ser repetido pelo menos cinco vezes [5].



3.1 COMPRESSORES

Os compressores são largamente utilizados nas indústrias para o acionamento e movimentação de equipamentos pneumáticos, em geral, comprimindo e armazenando o fluído em forma de gás, elevando sua pressão até o valor desejado em um reservatório, e, posteriormente, transformando-o em energia mecânica através de tubulações que podem percorrer longas distâncias [9].

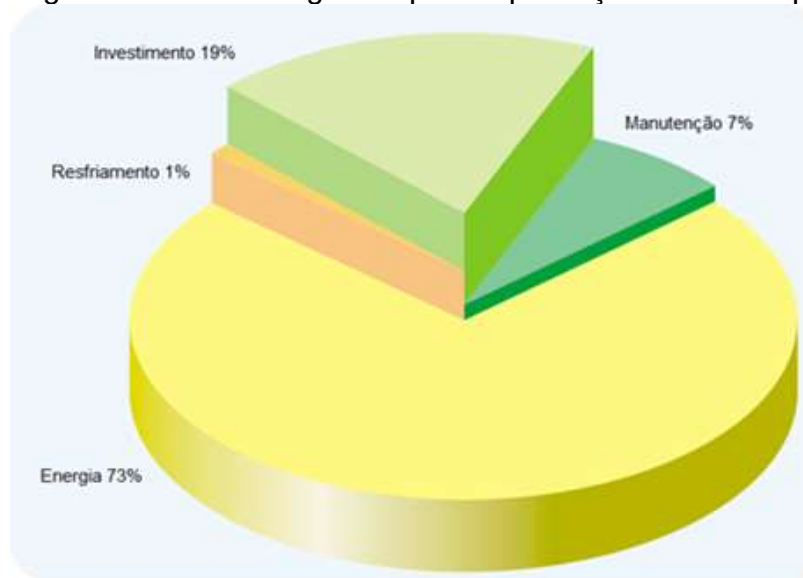
Esses equipamentos de uso industrial podem ser classificados entre compressores volumétricos ou de deslocamento positivo e dinâmicos, de acordo com a característica de seu movimento principal. Cada um possui outros subtipos com diferentes funções e formas de construção: alternativo e rotativo para o volumétrico e centrífugos ou axiais para os dinâmicos [9; 10].

A grande variedade de compressores disponíveis são utilizados em sistemas pneumáticos específicos, basicamente, de acordo com a pressão e vazão exigida [11].

As faixas de regulação de pressão são divididas em: baixa, média, alta e ultra-alta. A primeira é mais utilizada para ferramentas pneumáticas e atinge até 10 bar, a média, até 15 bar, para fabricação e manutenção de veículos, a alta tem valores de até 40 bar e é usada para testes em redes de fornecimento de ar, máquinas de sopro para o processamento de plástico e para ligar grandes motores a diesel, enquanto que a ultra-alta tem aplicações especiais como equipamentos para mergulho e atinge até 400 bar [11].

No processo de aquisição de um compressor, os que possuem maior eficiência energética oferecem grande vantagem econômica ao longo de sua vida útil. Conforme o gráfico da Fig. 2, o custo de aquisição é 54% menor que o consumo de energia para a produção de ar comprimido [12].

Figura 2: Diferentes gastos para a produção de ar comprimido



Fonte: adaptado [12]

Os compressores necessitam de energia elétrica porque seus processos de compressão são acionados na maioria dos casos, por motores elétricos assíncronos de grande e pequeno porte, de acordo com a aplicação. Esses motores realizam seus trabalhos em ciclos de liga/desliga conforme o seu valor de potência, que, quanto maior, esses ciclos diminuem. O motor continua ligado por um tempo quando o compressor atinge sua pressão máxima, sob um consumo de 20% a 30% da carga nominal enquanto o compressor entra em alívio [5].

3.2 MOTORES ELÉTRICOS

O motores de indução são dispositivo que transformam a energia elétrica em energia mecânica (potência ativa) e em energia térmica (energia reativa) [13]. Os motores mais comuns encontrados na indústria são os de indução trifásicos assíncronos, eles têm seu funcionamento baseado nos princípios do eletromagnetismo e podem ser encontrados com as mais diversas aplicações e características [13].

Em uma indústria, podem ser substituídos por motores mais eficientes quando há uma aplicação incorreta do equipamento, quando estão mal dimensionados, ou seja, são utilizados com carga acima ou abaixo da nominal. Outros problemas são muito comuns, tais como: perdas no acoplamento mecânico, manutenção inadequada, detritos no equipamento e lubrificação. A razão entre a potência



solicitada pelo motor pela potência elétrica utilizada no trabalho fornece o rendimento do equipamento (η), conforme a Eq. (3) [14; 15]:

$$\eta = \frac{\text{Potência mecânica}}{\text{Potência elétrica}} \quad (3)$$

Todos os motores estão regulados pela norma NBR-7094 que define os rendimentos mínimos de cada equipamento de acordo com sua característica e potência. Em relação a essas características, existem também os motores de alto rendimento, estes são fabricados e focados na melhoria das características onde existem as maiores perdas no motor [15; 16].

A partida de motores elétricos correspondem a um dos pontos mais críticos durante a sua operação. Isso acontece porque a corrente necessária para iniciar a movimentação do motor e retirá-lo do estado de inércia apresenta um pico de corrente de seis a oito vezes a corrente nominal, podendo chegar a dez vezes quando estiver sob carga, o que acarreta problemas na rede de alimentação e mesmo atuação dos dispositivos de segurança dos circuitos [15].

3.2.1 Partida direta

A partida direta é a forma mais simples de acionar os motores de corrente alternada (CA). A grande vantagem desse sistema é o seu custo, pois envolve a utilização de poucos componentes, como contadores para manobra e dispositivos de proteção como disjuntores e fusíveis [16].

Esse tipo de partida apresenta uma corrente de pico elevada para o motor sair do estado de inércia, no valor de seis a oito vezes a corrente nominal a vazio, ou até dez vezes sob carga. Isso causa quedas de tensão no sistema, além da necessidade de superdimensionar os cabos e dispositivos de acionamento [15].

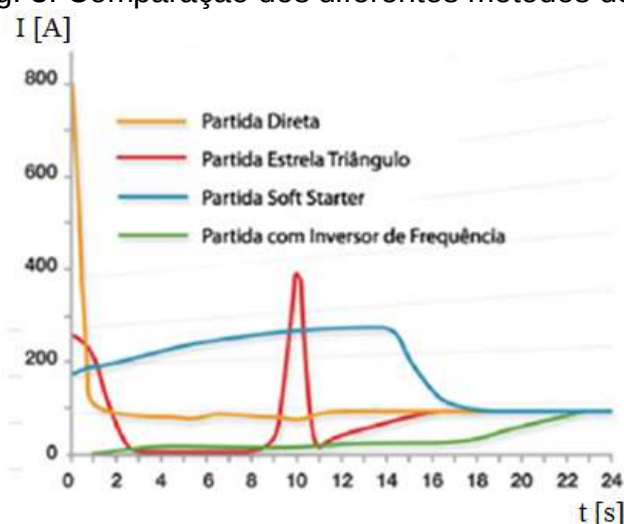
3.2.2 Inversos de frequência

Com o desenvolvimento da tecnologia e diminuição dos custos do equipamento, quando o controle de velocidade está envolvido no processo, o inversor de frequência é o método mais eficiente no acionamento de motores de indução [15].

- O inversor apresenta entre suas principais vantagens:
- Redução do consumo de energia;
- Controle da partida e parada, através de rampas;
- Aumento da vida útil do motor;
- Programação simples com funções automáticas temporizadas;
- Funções de proteção elétrica de todo o sistema
- Controle de velocidade durante a operação; e
- Fácil visualização dos dados de operação do equipamento e possibilidade de comunicação com redes externas [15;17].

A Fig. 3 ilustra a ótima atuação do inversor e compara as curvas de corrente de partida dos motores sob os diferentes modos de ligação e dispositivos.

Fig. 3: Comparação dos diferentes métodos de partida de motores



Fonte: [19]

Conforme a Fig. 3, o acionamento da partida direta gera um pico de tensão muito alto antes da estabilização, a estrela triângulo suaviza esse pico por partir em ligação estrela e após alguns segundos o sistema muda para ligação triângulo, neste momento, ocorre outro pico de tensão, mas com o motor já em operação. A curva da *Soft Starter* é programável e não gera um pico instantâneo mas o equipamento não permite o controle de velocidade. O inversor gera uma curva sem picos até que a velocidade nominal do motor seja alcançada e pode a controlar de acordo com a necessidade do sistema [18].



3.2.3 Fator de potência

A energia elétrica, entregue na maioria das indústrias, é em corrente alternada, sendo fornecida através de três fases defasadas em 120° . Quando uma carga resistiva é ligada à rede, ela opera com as ondas de tensão e corrente em fase, modificando suas polaridades no mesmo instante. Caso as cargas conectadas à rede forem reativas, provocam um atraso ou adiantamento dessas curvas porque a energia circula pela fonte para criar os campos necessários ao funcionamento do equipamento [19].

As cargas reativas são muito comuns na indústria, são os capacitores, motores e bombas. O fator de potência é indicado de forma indireta e representa o consumo da potência aparente, ativa e reativa dos equipamentos e a potência aparente é igual a soma vetorial da potência ativa e reativa e possuem um valor adimensional que varia de 0 a 1 [20].

O fator de potência das instalações elétricas deve ter um valor não inferior a 0,92, capacitivo ou indutivo, conforme a resolução da ANEEL 456 de 29/11/2000. Quando a instalação não atinge esse valor, na fatura é cobrado o consumo excedente da energia reativa e da demanda reativa [20].

A maioria das indústrias possui muitas cargas indutivas, no geral, motores e bombas. Então há uma necessidade de correção do fator de potência dos equipamentos individualmente, ou da instalação como um todo para evitar gastos desnecessários e melhorar o desempenho da rede de distribuição [19].

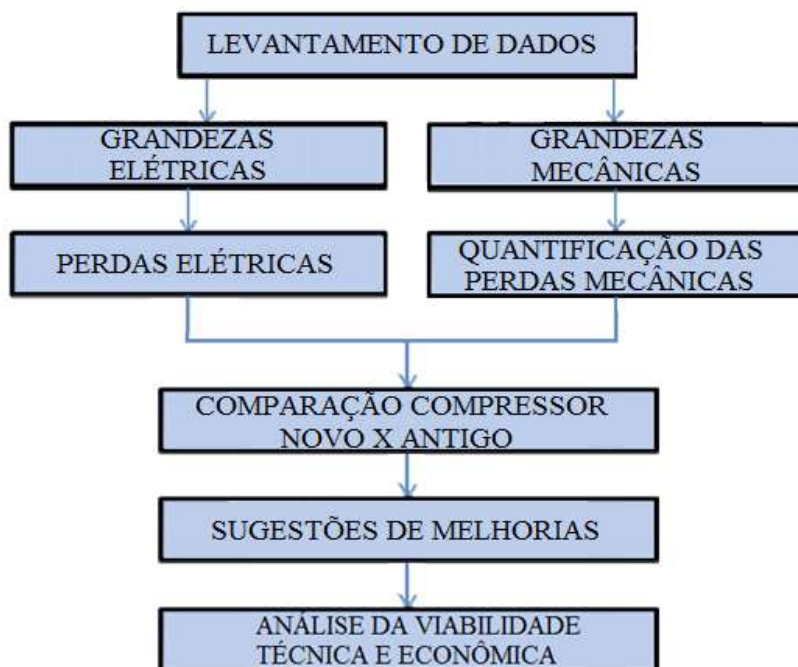
A correção de fator de potência indutiva é realizada através da instalação de bancos de capacitores fixos ou sistemas com controle automático que monitora a necessidade da rede [19].

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo deste Capítulo é apresentar um estudo da viabilidade técnica e econômica da substituição ou melhoria no sistema de controle do compressor de uma empresa metalúrgica. Serão apresentadas as oportunidades de melhoria do sistema de ar comprimido em função da eficiência energética e a comparação do compressor utilizado anteriormente com o atual.

O levantamento dos dados foi realizado com os dois compressores, o que foi substituído e o atual. A divisão entre a parte elétrica e mecânica do trabalho é feita para melhor compreensão do problema e suas soluções, conforme o fluxograma da Fig. 4, pois apenas uma análise elétrica pode negligenciar as perdas mecânicas que correspondem à grande parte do processo.

Fig. 4: Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: [Do Autor, 2018]

Posteriormente é realizada a comparação dos dois compressores, sugestões de melhorias e a análise do resultado da troca do equipamento.

Uma análise mais complexa ocorre na avaliação da viabilidade da substituição de um sistema previamente instalado.

As melhorias possíveis devem ser quantificadas em relação à economia de energia e custos de implantação e apresentadas as que possuem maior viabilidade, tal como substituição do equipamento ou instalação de um sistema de controle de partida e controle de velocidade. O consumo de energia do compressor deve ser comparado às possibilidades de economia disponíveis.

Um grande problema relacionado à parte elétrica é o mal dimensionamento da carga em relação à potência do compressor e ao seu sistema de controle. O levantamento das cargas envolvidas e do consumo do compressor são importantes

para a comparação da viabilidade econômica de alguma mudança no processo e também do custo da energia elétrica consumida.

O sistema utiliza o ar comprimido basicamente para sopradores de ar manuais, máquinas que fazem a mistura de resina e para misturar os gases durante o início do processo de aquecimento do forno.

4.1 COMPRESSOR ANTIGO

O compressor utilizado anteriormente na empresa tinha 19 anos de uso, com um motor de 60 CV (45kW), acionado por uma chave estrela-triângulo, operando em média nove horas por dia. A Fig. 5 e a Tab. 3 mostram as características deste modelo.

Fig. 5: Compressor antigo



Fonte: [Do Autor, 2018]

Tab. 3: Características técnicas do compressor antigo [Do autor, 2018]

COMPRESSOR DE PARAFUSO ROTATIVO						
Marca	Modelo	Ano	Potência (hp)	Potência (kW)	Pressão (bar)	Capacidade (m³/min)
Chicago Pneumatic	15-60LA ID	1999	60	45	7,2	8,1

Fonte: [Do Autor, 2018]

O compressor de parafuso é muito utilizado nestes tipos de aplicações industriais, mas a operação atuava com pressão mais alta que a indicada na placa

para atender corretamente as ferramentas na ponta do sistema, que possuía diversos pontos de vazamentos e o motor rebobinado diversas vezes devido a queima de suas bobinas.

4.2 MEDIÇÕES ELÉTRICAS: COMPRESSOR ANTIGO

A medição da corrente e potência do compressor é importante, por meio dela é possível constatar o comportamento do sistema, o seu tempo de trabalho em carga e alívio, além de problemas de funcionamento e sobrecarga no motor. As medições foram feitas na entrada do compressor por um analisador de energia trifásico - *AEMC - PowerPad MDL-8336* e com o alicate amperímetro *Fluke 345 PQ*, conforme Fig. 6. Ambos são capazes de registrar os dados elétricos por um período de tempo fornecendo gráficos e tabelas das medições. É importante observar que em uma indústria existem muito ruídos e interferências que aumentam os erros de medição, além do erro interno do próprio dispositivo que está realizando a tarefa.

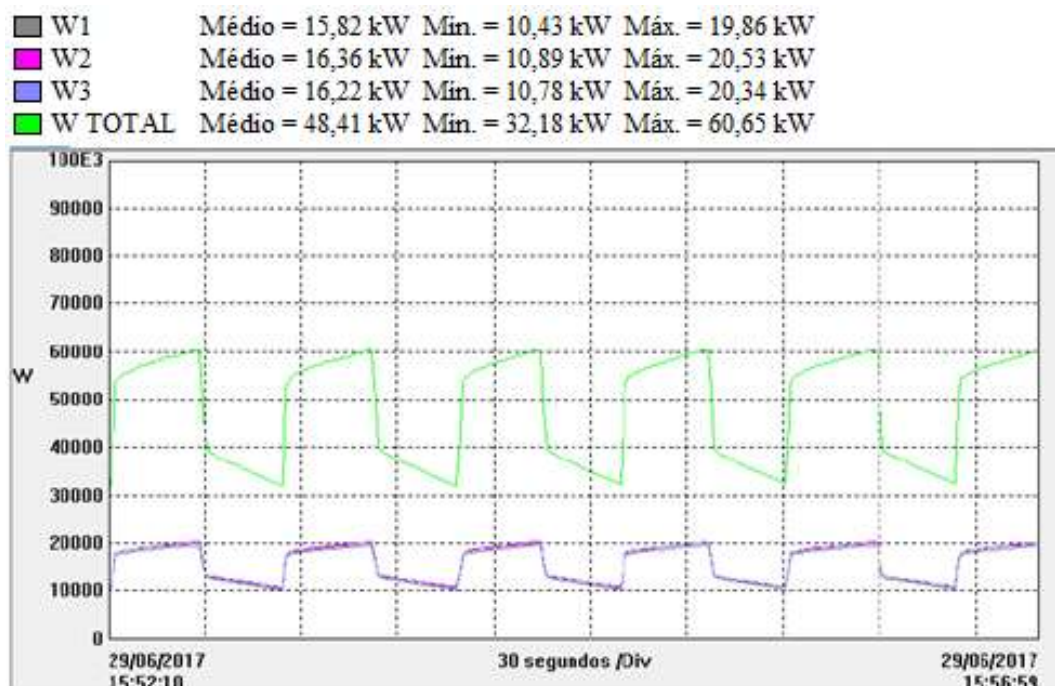
Fig. 6: Alicate amperímetro *Fluke 345 PQ*



Fonte: [Do Autor, 2018]

O levantamento das grandezas elétricas durante a operação normal é apresentado a seguir (Fig. 7), que permitem a observação da curva de potência que descreve o comportamento do equipamento atuando com carga.

Fig. 7: Medição da potência do compressor antigo



Fonte: [Do Autor, 2018]

As grandezas trifásicas médias que compõem a potência e o fator de potência são apresentados conforme a Tab. 4. Essas amostras representam um pequeno período de tempo, mas representam a média do comportamento normal do sistema em plena carga.

Tab. 4: Grandezas elétricas do compressor antigo

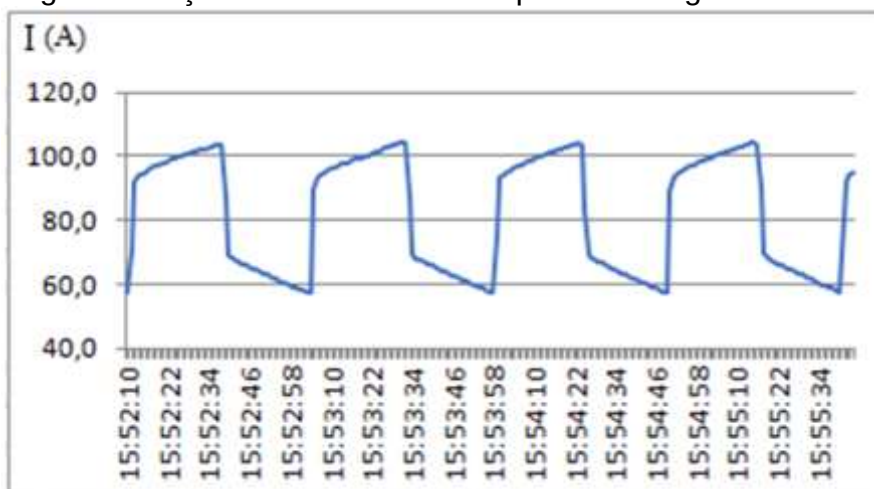
Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Fator de potência
15:53:15	383,6	98,2	0,84
15:53:16	383,8	98,4	0,84
15:53:17	383,6	98,9	0,88
15:53:18	383,5	99,3	0,88
15:53:19	383,4	99,6	0,88
15:53:20	383,3	100,0	0,88
15:53:21	383,3	100,3	0,88
15:53:22	382,7	100,9	0,88
15:53:23	382,8	101,3	0,88
15:53:24	383,1	101,5	0,88
15:53:25	383,3	101,8	0,88

Fonte: [Do Autor, 2018]

A corrente possui a variação conforme a curva da potência, durante os ciclos de carga e alívio do compressor, e a observação da variação dela se torna mais clara

través da visualização do gráfico (Fig. 8) que apresentam quatro ciclos do equipamento e a corrente trifásica que varia de 58,1 a 104,5 A.

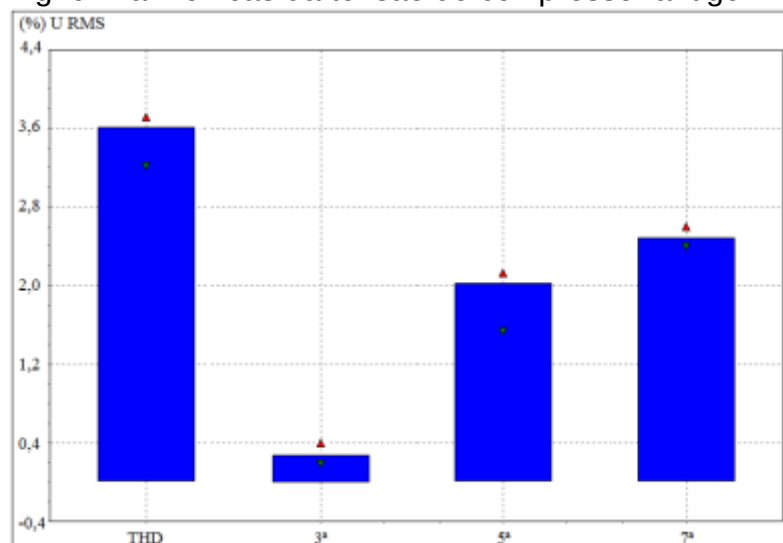
Fig. 8: Medição da corrente do compressor antigo



Fonte: [Do Autor, 2018]

As harmônicas foram medidas para avaliar o nível de distorção das curvas de tensão no qual a distorção harmônica total (THD) da tensão, e as de 3ª, 5ª e 7ª ordem apresentavam os valores mais relevantes, e são apresentadas na Fig. 9 em forma de histograma em relação a curva da tensão trifásica.

Fig. 9: Harmônicas da tensão do compressor antigo



Fonte: [Do Autor, 2018]

Conforme a Fig. 9 os dados coletados mostram que as harmônicas totais não ultrapassam 5%, valor que pode afetar a rede elétrica do sistema e os dispositivos à ela conectados.

4.3 MEDIÇÕES MECÂNICAS: COMPRESSOR ANTIGO

A parte mecânica do sistema é também um ponto crítico de desperdício que refletem no consumo de energia elétrica por parte do motor do compressor, seja por baixa qualidade do ar comprimido, umidade e pureza, ou por vazamentos, que a longo prazo podem refletir em um alto consumo no processo.

O modelo antigo do compressor estava regulado para a pressão de 8,6 bar sendo que o especificado pelo fabricante é de 7,2 bar para atender à vazão de 8,1 m³/min.

A coleta dos dados de carga e alívio foi realizada com o objetivo de quantificar as perdas em razão dos vazamentos. Foram utilizados dois cronômetros, um mediu o tempo total e o outro os tempos de carga, sempre com toda a rede conectada, mas fora de operação, conforme a Tab. 5.

Tab. 5: Tempo carga/alívio compressor antigo

Indicador	1	2	3	4	5	Média	Total	Alívio (%)	Carga (%)
Tempo de Carga (s)	11,49	11,18	10,2	10,19	11,1	10,83	54,16	76,7	23,2
Tempo de Alívio (s)	31,43	36,51	37,39	37,6	36,25	35,83	179,2		
Tempo total (s)								233,34	

Fonte: [Do Autor, 2018]

Por meio destes valores é possível determinar o consumo que a rede gasta, quando não está em operação, devido aos vazamentos conforme a Eq. (2).

$$Q_{vaz1} = 8,1 * \frac{54,16}{233,34} = 1,88 \text{ m}^3/\text{min}$$

Onde:

Q_{vaz2} = vazão atribuída aos vazamentos do compressor novo (m³/min).

A quantificação das perdas desse compressor por vazamentos atingiu 23,21% do total 8,1 m³/min de vazão, durante o período recomendado de cinco ciclos de carga e alívio, totalizando 11,23 kWh.

4.4 COMPRESSOR NOVO

O compressor antigo foi recentemente substituído por outro, devido ao tempo de uso, e apresentado na Fig. 10.

Fig. 10 - Compressor GA45 Atlas Copco



Fonte: [Do Autor, 2018]

O novo compressor também é de parafuso rotativo, pois é o tipo que se aplica melhor para a faixa de atuação necessária (8,2 m³/min) e possui partida estrela/triângulo e características semelhantes ao primeiro com relação a potência e modo de funcionamento como mostra a Tab. 6.

Tab. 6: Características técnicas do compressor novo

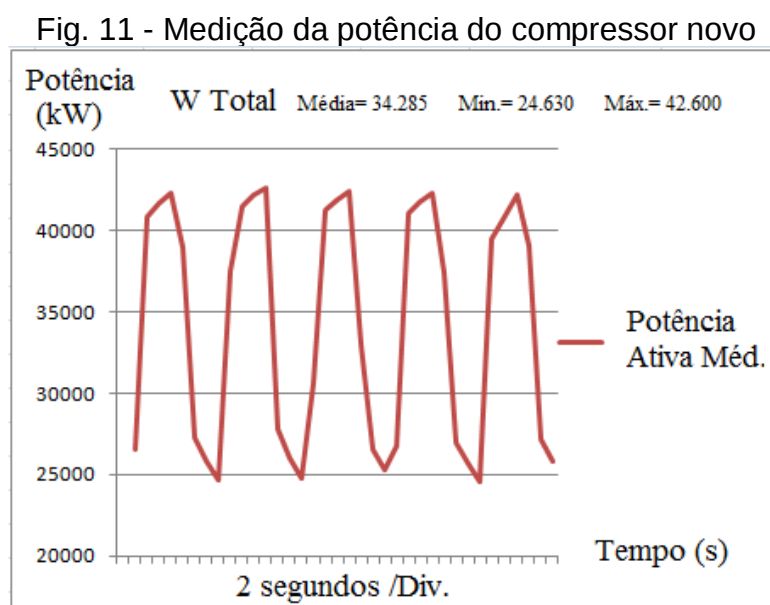
COMPRESSOR DE PARAFUSO ROTATIVO						
Marca	Modelo	Ano	Potência (hp)	Potência (kW)	Pressão (Bar)	Capacidade m ³ /min
Atlas Copco	GA45	2013	60	45	7,4	8,2

Fonte: [Do Autor, 2018]

Os dados coletados em campo fornecem as informações específicas para que condições ele estava operando e são utilizados para a análise posterior das possíveis adequações técnicas. As medições no equipamento novo foram realizadas da mesma forma do caso anterior, para a posterior comparação entre os dois.

4.5 MEDIÇÕES ELÉTRICAS: COMPRESSOR NOVO

A potência trifásica do compressor novo (Fig. 11) demonstra o comportamento típico do sistema com as curvas durante os ciclos de carga e alívio durante a operação normal de produção.



Fonte: [Do Autor, 2018]

Conforme as medições, é possível perceber que o compressor novo está atuando dentro da faixa de potência do motor, atingido a potência máxima de 42,6 kW durante a operação normal com a potência média calculada de 34,3kW.

Para uma melhor análise dos tempos de carga e alívio do processo, a Tab. 7 apresenta 5 ciclos típicos durante a operação. Esses dados são importantes pois revelam o tempo total de alívio, momento em que o motor consome em torno de 40% de energia mas não gera ar comprimido para a rede.

Tab. 7: Tempo carga/alívio compressor novo com a fábrica em operação

Indicador	1	2	3	4	5	Média	Total	Alívio (%)	Carga (%)
Tempo de Carga (s)	8,11	7,53	6,80	8,26	8,32	7,36	39,02	50,66	49,34
Tempo de Alívio (s)	7,82	8,25	7,91	7,68	8,40	36,49	40,06		
Tempo total (s)							79,08		

Fonte: [Do Autor, 2018]

A Tab. 8 demonstra a tensão, a corrente e o fator de potência atual durante um período de tempo determinado, com o equipamento trabalhando sob carga.

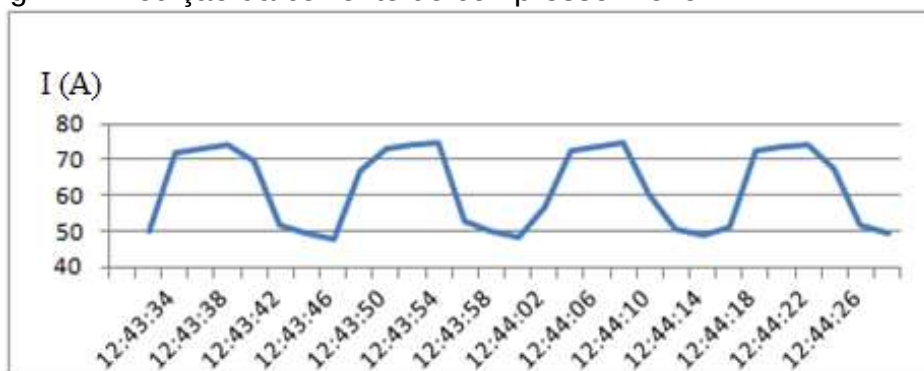
Tab. 8: Grandezas elétricas do compressor novo [Do Autor, 2018]

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Fator de potência
12:43:32	384,3	50,3	0,88
12:43:34	382	72	0,88
12:43:36	382	73,3	0,88
12:43:38	381,5	74,2	0,88
12:43:40	381,8	69,6	0,88
12:43:42	383,5	51,6	0,88
12:43:44	383,8	49,5	0,88
12:43:46	383,9	47,9	0,88
12:43:48	382,1	67	0,88
12:43:50	381,5	73,1	0,88

Fonte: [Do Autor, 2018]

A corrente trifásica do compressor novo está representada na Fig. 12 que demonstram os picos de corrente durante os ciclos de carga e alívio do sistema, com valores entre 47,8 a 74,9 A.

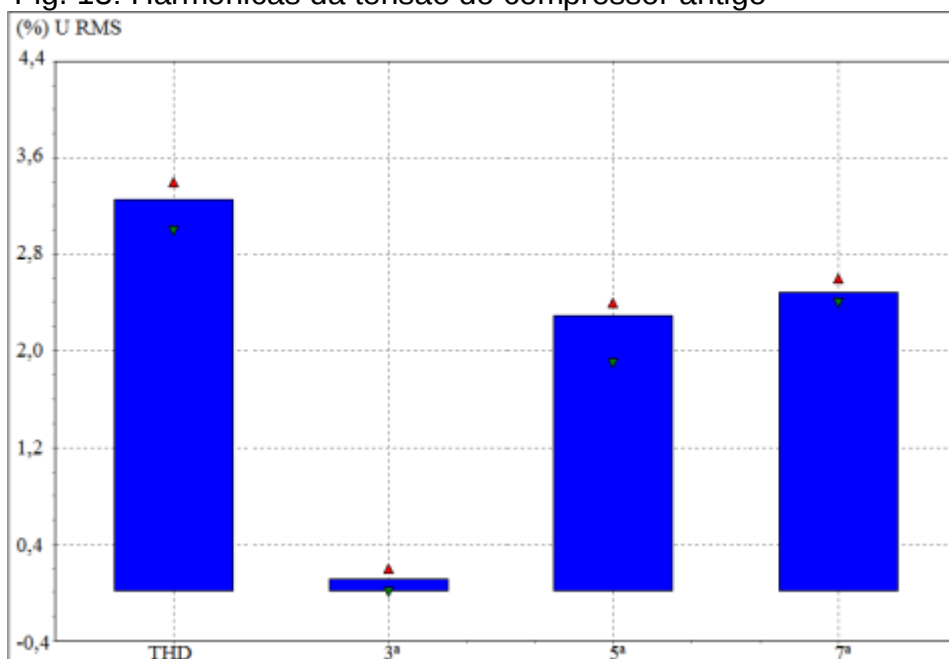
Fig. 12 - Medição da corrente do compressor novo



Fonte: [Do Autor, 2018]

O histograma da THD e das harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem é apresentado na Fig. 13, para a posterior comparação com o equipamento antigo.

Fig. 13: Harmônicas da tensão do compressor antigo



Fonte: [Do Autor, 2018]

As harmônicas do compressor novo também estão dentro da faixa recomendável para o circuito elétrico da indústria sem grande interferência no funcionamento de outros equipamentos.

4.6 MEDIÇÕES MECÂNICAS: COMPRESSOR NOVO

O compressor novo está regulado para a pressão máxima de 7,6 bar e ocorreu manutenção visando a supressão de vazamentos nas linhas de distribuição e equipamentos da rede. A Tab. 9 mostra cinco ciclos de carga e alívio do sistema atual para o procedimento de quantificação dos vazamentos.

Tab. 9: Tempo carga/alívio compressor novo com a fábrica parada

Indicador	1	2	3	4	5	Média	Total	Alívio (%)	Carga (%)
Tempo de Carga (s)	7,36	8,38	6,80	7,12	7,16	7,36	36,82	83,21	16,79
	34,96	36,45	37,39	36,93	36,74	36,49	182,47		



Tempo de
Alívio (s)

Tempo total (s)

219,29

Fonte: [Do Autor, 2018]

Realizando os cálculos por (2), obtém-se a quantidade de ar perdida com os vazamentos.

$$Q_{vaz2} = 8,2 * \frac{36,82}{219,29} = 1,38 \text{ m}^3/\text{min}$$

Onde:

Q_{vaz2} = vazão atribuída aos vazamentos do compressor novo (m^3/min).

Com o valor de $1,38 \text{ m}^3/\text{min}$ de vazamentos e a vazão total de $8,2 \text{ m}^3/\text{min}$, totaliza-se 16,83% de perdas para suprir esse problema, durante o período recomendado de cinco ciclos de carga e alívio, que equivale a 5,77 kWh em energia.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é analisado a comparação do compressor novo com o antigo conforme as medições realizadas em campo e os cálculos dos resultados de consumo e a economia de energia presumida após as ações.

São apresentadas também, sugestões de possíveis melhorias no sistema atual e a viabilidade da implantação delas no contexto em que a empresa se encontra atualmente.

5.1 COMPARAÇÃO COMPRESSOR NOVO X ANTIGO

O compressor antigo apresentava diversos problemas durante sua operação, falhas durante os ciclos de carga e alívio, manutenção acentuada pelo desgaste de peças devido ao uso, motor rebobinado várias vezes por queima das bobinas e com comportamento diferente do esperado e tempo perdido com a máquina parada para os consertos de reparação.

5.1.1 Análise das medições elétricas

Na análise das curvas de potência é possível perceber o comportamento semelhante dos dois sistemas no formato das curvas, mas os valores da potência consumida no primeiro compressor está muito acima do esperado, atingindo picos de 60,5 kW, enquanto a potência máxima trifásica do equipamento novo é de 42,6 kW com média em torno de 34,3 kW contra 48,41 de média do antigo.

As tensões das fases medidas para ambos os compressores ficaram na faixa de 380V a 385V, sendo que não foram constatadas quedas de tensão significativas que indicassem sobrecarga no sistema.

Como a potência é diretamente proporcional à corrente, o alto consumo do compressor antigo é o responsável pelos valores elevados que geram um consumo maior de energia. Provavelmente o fato está relacionado com as diversas rebobinagens do motor e seu tempo de uso e a pressão maior necessária para suprir o ar na ponta da rede. A corrente do compressor novo atingiu picos de 74,9 A diante de 104,5 A para a situação anterior.

O fator de potência demonstra o quanto de energia útil está sendo transformada em trabalho, os valores dos dois equipamentos podem ser considerados baixos, ambos em torno de 0,88. Ambos apresentaram alguma variação entre 0,83 e 0,89 dependendo do horário, enquanto que o novo apresentou maior estabilidade do valor durante a operação durante as medições.

Os valores médios das harmônicas medidas apresentados nas Fig. 9 e 13 podem ser comparados na Tab. 10.

Tab. 10: Comparação das harmônicas de tensão dos compressores

Harmônicas	THD	3 ^a	5 ^a	7 ^a
Compressor antigo	3,59	0,27	2,07	2,47
Compressor novo	3,27	0,17	2,25	2,49

Fonte: [Do Autor, 2018]

Essas taxas de harmônicas e de fator de potência semelhantes permitem o funcionamento adequado do equipamento, sem a necessidade de filtros para a correção das harmônicas, e a correção do fator de potência é realizada na entrada da instalação por um banco de capacitores.

A comparação demonstra a vantagem do equipamento novo devido as poucas perdas relacionadas ao desgaste do equipamento, seu motor não possui manutenções de rebobinagens que alteram as características elétricas de fábrica e geram maiores perdas e a tecnologia envolvida no equipamento oferece maior facilidade de operação e controle dos dados do sistema por meio do display de programação.

Outro fator crítico que gera desperdício de energia é o aumento da pressão de trabalho. A pressão de trabalho deve ser capaz de vencer os obstáculos ao fluxo de ar e entregar no equipamento final o necessário para atender sua demanda. A diferença entre a pressão do uso final e gerada deve estar próxima para evitar que o compressor funcione mais tempo que o necessário. O compressor novo atua de forma mais eficiente calibrado para uma pressão máxima de 7,6 com diferença de 1 bar em relação ao antigo.

Calculando-se a diferença de consumo dos dois compressores, a economia proveniente do compressor novo é em torno de 14,1 kW no período de uma hora. O valor da tarifa do kWh pago pela empresa é de R\$ 0,11472 e o tempo de trabalho anual do equipamento é estimado em oito horas por dia e 20 dias por mês, totalizando 1.920 horas.

Realizando a multiplicação desses valores é obtido a estimativa de economia anual com a troca do compressor realizada (Tab. 11).

Tab. 11: Economia anual de consumo do compressor novo [Do autor, 2018]

Economia anual (kWh)	R\$/kWh	Tempo de trabalho (h)	Economia anual (R\$)
14,1	0,11472	1.920	3.105,70

Fonte: [Do Autor, 2018]

O valor final obtido com a economia do consumo de energia justifica a troca realizada para o compressor, porque também existem outras vantagens na troca do equipamento antigo: menor custo de manutenção, menos problemas de operação e diminuição do tempo de parada, que não foram contabilizados neste estudo.

5.1.2 Análise das medições mecânicas

Um bom planejamento de manutenção reduz as perdas de linha com atuações direta nos equipamento e nos pontos que apresentam irregularidades mitigando os



vazamentos encontrados, a maioria destes, nos pontos de junção de engate rápidos e mangueiras.

Com a capacidade de vazão do compressor antigo de 8,1 m³/min e a demanda média em carga de 48,4kW, as perdas de 23,21% correspondem a 11,23 kW no período de uma hora. Para o equipamento novo com potência média de 34,3 kW, o consumo necessário para suprir os vazamentos de 5,77 kW durante uma hora para 16,83% de perdas.

Como os compressores possuem características semelhantes, a economia com as perdas por vazamento estão diretamente relacionadas com a ação direta nos pontos de vazamento encontrados, chegando a uma economia de 5,46 kW no período de uma hora, que representam 10.485 kWh por ano. Com esses valores é obtido o valor da economia estimada pela supressão dos vazamentos (Tab. 12).

Tab. 12: Economia anual com a atenuação dos vazamentos do compressor novo

Economia anual (kWh)	R\$/kWh	Economia anual (R\$)
10.485	0,11472	1.202,84

Fonte: [Do Autor, 2018]

Um sistema livre de vazamento é muito complexo de ser executado, mas os 16,83% de perdas atuais podem representar oportunidades para melhorias futuras.

5.2 ANÁLISE GERAL

As medições apresentam alguns pontos críticos do sistema pneumático que demonstram um maior desperdício de energia. A economia total atingida medindo e calculando esses pontos pode ser mensurada ao longo de um ano para uma posterior conferência conforme apresentado na Tab. 13.

Tab. 13: Previsão da economia anual total [Do autor, 2018]

	Economia anual (kWh)	KWh (R\$)	Economia anual (R\$)	Economia total anual (R\$)
Consumo de energia	27.072	0,11472	3.105,70	4.308,64
Diminuição dos vazamentos	10.485	0,11472	1.202,84	

Fonte: [Do Autor, 2018]



O valor economizado anualmente com a troca do compressor e atuação sobre os vazamentos mostra a importância do constante monitoramento das oportunidades de economia e diminuição de desperdícios.

5.3 SUGESTÕES DE MELHORIAS

O compressor instalado recentemente possui características semelhantes ao anterior, mesmo assim, foi constatado economia com os gastos de energia elétrica, mas esse ganho pode ser maior incluindo o controle de velocidade do sistema, pois conforme a Tab. 7 apresentou, o sistema opera aproximadamente 50% do tempo em alívio.

As sugestões de melhorias de eficiência apresentadas consideram uma aplicação onde o compressor trabalha oito horas por dia, 20 dias por mês, com o total de 1.190h por ano.

A solução sugerida são a instalação de um inversor de frequência para o controle de velocidade do motor ou a substituição do compressor por um com velocidade controlada.

A partir dos dados coletados é necessário a análise se o tipo de acionamento fornece a oportunidade de melhoria da eficiência no uso do ar comprimido.

5.4 INSTALAÇÃO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O equipamento analisado demonstra um ciclo rápido de carga e alívio do compressor que demanda um consumo maior do motor, sendo que um sistema de controle de velocidade por meio de inversor é recomendável.

Os tempos de alívio e carga da Tab. 7 mostram que em 50% do tempo o motor está trabalhando para produzir ar para o sistema, considerando a potência nominal do motor de 45kW isso equivale a 22,5 kW no período de uma hora. Considerando um consumo de 25% de energia do motor durante o tempo de alívio, é constatado que 11,25 kWh são utilizados apenas para manter o motor em funcionamento.

Tab. 14: Comparação do consumo do compressor sem inversor x com inversor

	COMPRESSOR SEM INVERSOR	COM INVERSOR
Tempo de carga (s)	8	Contínuo 50%
Tempo de alívio (s)	8	Não se aplica
Consumo carga (kWh)	22,5	22,5
Consumo carga/ano (kWh)	43.200	43.200



Consumo alívio (kWh)	11,25	Não se aplica
Consumo alívio/ano (kWh)	21.600	Não se aplica
Consumo anual (kWh)	64.800	43.200

Fonte: [Do Autor, 2018]

Com a instalação de um inversor o motor trabalha com a potência e velocidade necessária para suprir a demanda de energia do momento. A Tab. 14 mostra a comparação dos dois sistemas e estima uma economia de energia de 21.600 kWh para a situação encontrada em campo, que equivale a 33,33% a menos de consumo. A economia financeira estimada nesse cenário é apresentado na Tab. 15.

Tab. 15: Estimativa da economia financeira com inversor [Do autor, 2018]

Custo/ano atual (0,11472 kWh)	Custo/ano com inversor (0,11472 kWh)	Economia/ano
R\$ 7.433,86	R\$ 4.955,90	R\$ 2.477,96

Fonte: [Do Autor, 2018]

A taxa de retorno simples pode ser obtida a partir da Eq. (4), dos dados da Tab. 15 e com o preço do inversor de R\$ 10.585,90.

$$\text{Taxa de retorno} = \text{Investimento} / \text{Economia anual} \quad (4)$$

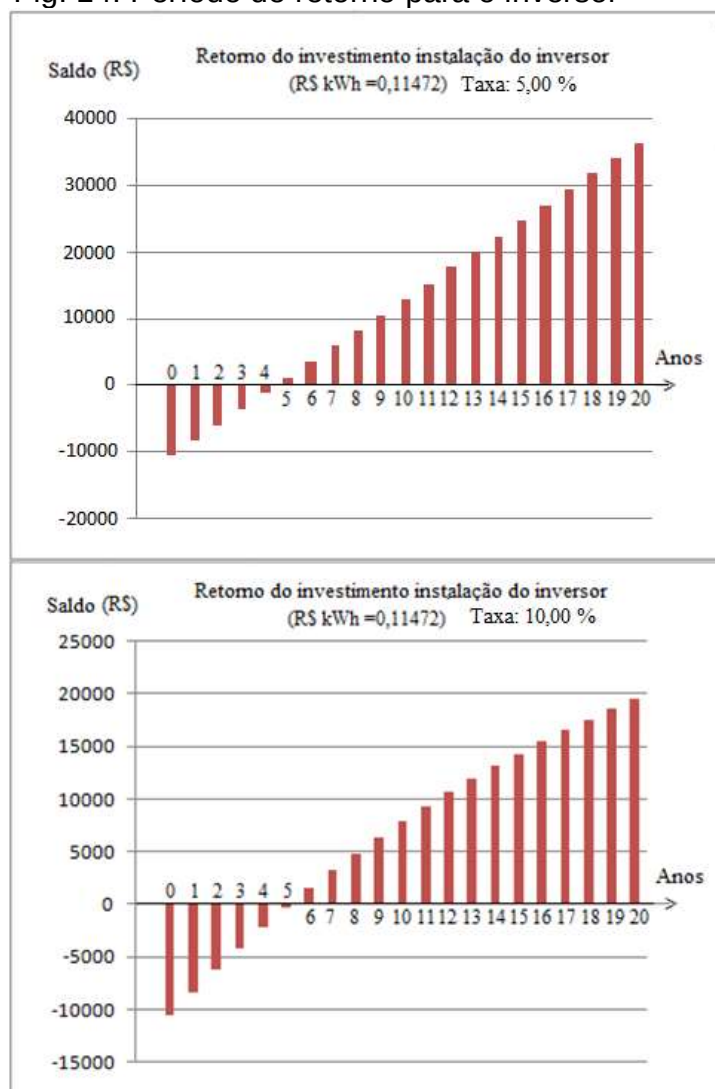
Tab. 16: Taxa de retorno simples para o inversor [Do Autor, 2018]

Investimento (R\$)	Economia anual (R\$) Preço do kWh (0,11472)	Taxa de retorno simples
10.585,90	2.477,96	4 anos e 3 meses

Fonte: [Do Autor, 2018]

Analisando dois cenários diferentes: um com a taxa de juros de 5,00% e outro com 10,00% e ambos com acréscimo de 5% ao ano da tarifa de energia, o *payback* da aplicação obtido é apresentado no gráfico da Fig. 14.

Fig. 14: Período de retorno para o inversor



Fonte: [Do Autor, 2018]

Analisando o gráfico da Fig. 14, o tempo de retorno do investimento ocorre, segundo os parâmetros definidos, entre o 4º e 5º ano para uma taxa de 5,00% ao ano e entre o 5º e 6º ano quando a taxa considerada é de 10,00% ao ano. A vantagem econômica obtida no final do período de 20 anos atinge o valor total de R\$ 36.613,34 no primeiro cenário e de R\$ 19.427,36 para o segundo.

Por meio dos dois gráficos pode se observar que a taxa anual de 5,00% ao ano tem o retorno do investimento antecipado em aproximadamente doze meses.

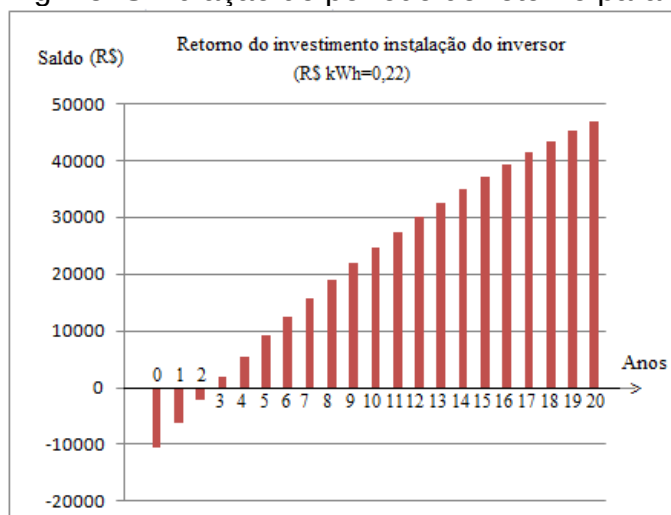
Devem-se considerar outras despesas extras devido à utilização do inversor, como custos de instalação, parametrização e manutenção do equipamento, componentes auxiliares, transdutor de pressão e possíveis problemas relacionados ao superaquecimento do motor trabalhando em diferentes velocidades de rotação.

Normalmente até 10 % do custo de investimento cobrem estas despesas e afetam o tempo de retorno do investimento negativamente.

O custo de investimento para o inversor na situação real da empresa se demonstra uma possibilidade a ser considerada devido ao tempo de retorno à médio/longo prazo. Apesar das vantagens que o inversor oferece quando é utilizado, seis anos para a recuperação do investimento não é muito atrativo para os investidores.

É possível considerar o baixo preço da tarifa do kWh pago pela empresa, o aspecto mais relevante para o alto tempo de retorno nesse caso. Em face disso, foi feita uma simulação com uma tarifa de kWh de R\$ 0,22, o dobro do preço real, valor aproximado que pode ser encontrado em outras distribuidoras de energia, o gráfico que demonstra essa simulação é apresentado na Fig. 15.

Fig. 15: Simulação do período de retorno para o inversor



Fonte: [Do Autor, 2018]

No caso da simulação, o resultado do tempo de retorno do investimento se torna viável, após o terceiro ano, resultando em um ganho final de R\$ 46.970,72, ao final do período de 20 anos de vida útil do equipamento.

O investimento nesta última situação poderia ser cogitado, mesmo considerando os outros fatores variáveis que influenciam na economia de energia, como o nível de produção e mudanças nas horas de trabalho do equipamento.

Por se tratar de uma situação específica local, essa simulação pode apenas dar uma ideia que em indústrias com o valor do kWh mais alto, um investimento para o controle de velocidade tende a ser viável.



5.5 ATUALIZAÇÃO PARA COMPRESSOR COM INVERSOR

O compressor atual foi instalado recentemente, logo a análise da viabilidade da troca do compressor por outro com controle de velocidade não é a simulação mais adequada ao momento. Uma visão mais clara quanto a vantagem de um equipamento completo preparado com esta função pode ser feita calculando a diferença de custos entre os dois diferentes equipamentos no instante anterior a troca ser realizada. Desse modo é possível estimar qual é tempo de retorno do investimento e sua viabilidade econômica.

Claramente, um equipamento completo de fábrica é preparado exclusivamente para a função e não necessita de adequações locais na instalação, a operação e os ajustes são menos complexos, assim os cuidados e custos na realização de adaptações são desnecessários.

O custo estimado do compressor adquirido representa em torno de 60% de um equipamento com inversor de fábrica, com algumas variações conforme os diferentes fabricantes.

A Tab. 17 apresenta o retorno simples do equipamento, considerando a diferença de investimento entre o compressor atual e o modelo com controle de velocidade. Esse valor está em torno de R\$ 18.000,00 e foram utilizados os dados de consumo de energia conforme informações do manual do fabricante.

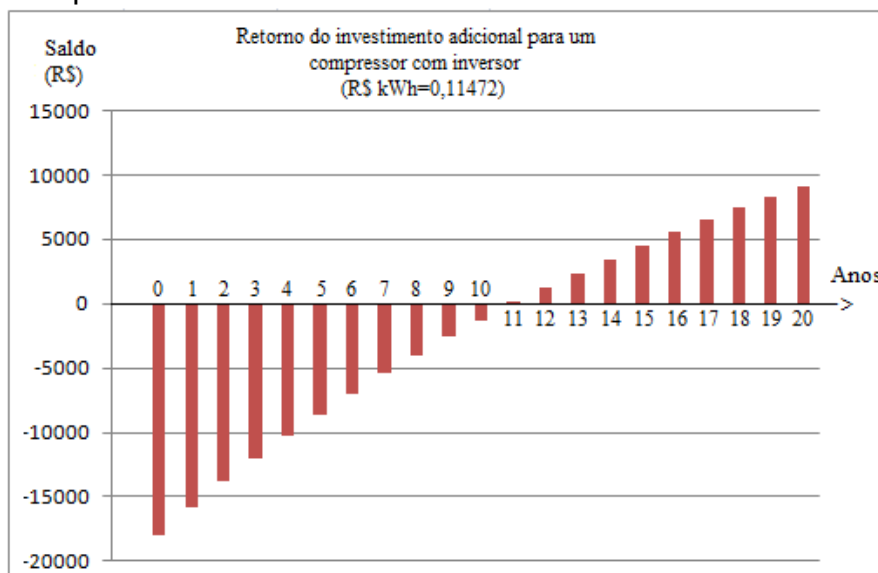
Tab. 17: Taxa de retorno simples na troca do compressor

Potência média (catálogo)	45 kW
Consumo anual	43.200 kWh
Redução (devido ao inversor)	30%
Economia anual	21.600 kWh
Preço do kWh	R\$ 0,11472
Economia anual (R\$)	R\$ 2.477,96
Investimento adicional	R\$ 18.000,00
Taxa de retorno simples	8 anos e 1 mês

Fonte: [Do Autor, 2018]

A taxa de retorno simples alta indica um *payback* maior do investimento quando aplicado uma taxa de juros de 10,00% e o acréscimo de 5% ao ano da tarifa de energia, o resultado dessa simulação é obtido e apresentado no gráfico da Fig. 16.

Fig. 16: Período de retorno para o investimento adicional para o compressor com inversor



Fonte: [Do Autor, 2018]

O tempo de retorno de 11 anos é muito alto para a troca do sistema para um compressor novo com controle de velocidade, tornando inviável economicamente esta aplicação apesar da economia anual de 21.600 kWh.

O alto valor inicial do equipamento resulta em uma desmotivação para a aplicação na situação atual, o preço em torno de 60% do compressor mais simples com acionamento estrela-triângulo e as mesmas características se torna muito mais atraente, sendo que a substituição do equipamento antigo era necessária.

CONCLUSÃO

A questão da eficiência energética deve ser um dos focos principais ao analisar a aquisição ou atualização de qualquer equipamento nas indústrias atuais, pois podem refletir em um alto valor gasto em energia que pode ser utilizado para outros investimentos, onde as atualizações são mais complexas e dispendiosas, e muitas vezes a análise dos fatores envolvidos na empresa pode poupar desperdícios que as indústrias nem percebem que estão ocorrendo.

A substituição do compressor antigo era necessária porque sua vida útil estava no fim e as manutenções eram constantes, a comparação entre os dois compressores demonstrou que apesar das mesmas características a troca do equipamento apresentou um menor consumo de energia.



A diminuição da pressão de trabalho e a mitigação dos pontos críticos de vazamentos de ar resultou em outro ponto de economia de energia, mas essa manutenção deve ser constante para que o desperdício não retorne ao sistema. Para a obtenção destes resultados, o tempo de retorno financeiro, os possíveis gastos extras devido as adaptações e as considerações utilizadas para o cálculo devem ser analisadas criteriosamente. O custo do kWh calculado corresponde ao valor pago pela empresa no ano de 2018, sendo que valores mais altos que estes são facilmente encontrados em outras distribuidoras de energia. Em situações onde isso ocorre, os gastos com energia se tornam maiores e a economia prevista para estas indústrias podem refletir em diferentes resultados e conclusões.

Quanto mais alto o valor da energia, maiores as oportunidades de recuperação do investimento em um curto período de tempo, mas cada caso deve ser analisado individualmente, de acordo com a aplicação da indústria e a forma de trabalho. Também existe o importante aspecto da empresa operar basicamente em horário comercial, todas as despesas de energia poderiam crescer significativamente devido ao horário de ponta.

Com isso se pode concluir que a empresa trabalha com a solução mais viável economicamente para a sua situação, mas outros pontos de economia podem ser trabalhados para um aumento de eficiência.

REFERENCIAS

[1] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Guia prático:** Conceitos e Ferramentas de Gestão e Auditoria Energéticas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2015. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 21 abr. 2018.

[2] CARDOSO, André Oliveira. **As faces da indústria metalúrgica no Brasil**. São Paulo: Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos, 2015.

[3] EPE- Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Rio de Janeiro: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, ano X, n. 122, janeiro de 2017. Disponível em: <[www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-154/Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica - Janeiro - 2017.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-154/Resenha%20Mensal%20do%20Mercado%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20-%20Janeiro%20-%202017.pdf)>. Acesso em: 21 abr. 2018.



- [4] EPE- Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiael%C3%A9tricaaporclasse%E2%80%93931995-2009.aspx>>. Acesso em: 17 de setembro de 2017.
- [5] ROCHA, Carlos Roberto; MONTEIRO, Marco Aurélio Guimarães. **Manual prático: eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL.
- [6] EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance**. Volume 1. Disponível em: <www.abesco.com.br/wp-content/uploads/2015/07/PIMVP_2012-PTBR.pdf>. Acesso em: 21 de abril de 2018.
- [7] BOSCH. **Manual técnico: tecnologia de ar comprimido**. Campinas, 2008. Disponível em: <http://www.bosch.com.br/br/ferramentas_pneumaticas/produtos/downloads/ManualPneumatica_ARComprimido.pdf>. Acesso em: 21 de abr. 2018.
- [8] FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação pneumática: Projetos, dimensionamentos e análises de circuitos**. São Paulo: Érica, 2011.
- [9] ROLLINS, John. **Manual de ar comprimido e gases: Compressed air and gas institute**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- [10] COSTA, Ênio Cruz da. **Compressores**. São Paulo: Edgar Blücher, 1978.
- [11] RODRIGUES, Paulo Sergio. **Compressores Industriais**. Rio de Janeiro: Didática e Científica, 1991.
- [12] PROCEL/ELETROBRÁS. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. 2009. Disponível em: < <https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/ManualArComprimido.pdf> >. Acesso em: 23 mai. 2018.
- [13] CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétricas: teorias e ensaios**. São Paulo: Érica, 2010.
- [14] ELETROBRÁS/PROCEL EDUCAÇÃO; UNIFEI. **Eficiência energética: teoria e prática**. Itajubá: FUPAI, 2007. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Efic%20En-Teoria%20e%20Pratica-Eletr-Procet-Unifei%20-07.pdf> >. Acesso em: 18 Mar. 2018.
- [15] FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2008.



- [16] SEGUNDO, Alan Kardek. **Eletrônica de potência e acionamentos elétricos**. Ouro Preto: Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto, 2015.
- [17] FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: teorias e aplicações**. São Paulo: Érica, 2008.
- [18] ARPRESSI. Disponível em <http://www.arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227>>. Acesso em: 23 Set. 2017.
- [19] ELETROBRÁS. **Metodologia de realização de diagnóstico energético: guia básico**. Brasília : IEL/NC, 2009. Disponível em: <[https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Metodologiaderealizaodediagnostico.p](https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Metodologiaderealizaodediagnostico.pdf)
[df](https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Metodologiaderealizaodediagnostico.pdf)> Acesso em: 23 mar. 2018.
- [20] GUEDES, José Carlos de Souza. **Manual de tarifação**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2011. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2018.