



Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos
Processos Produtivos**

Polo: Novo Hamburgo

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SISTEMAS PNEUMÁTICOS
VOLTADOS AO USO DE FERRAMENTAS MANUAIS**

BRUSCHI, Diogo Lino¹

CAUDURO, Carlos Roberto²

RESUMO

Grande parte das empresas não realiza ações voltadas à manutenção da qualidade do ar comprimido, fazendo com que se produza muita energia pneumática que não é utilizada e que acaba sendo perdida em vazamentos. Este trabalho se trata de um estudo focado na aplicabilidade de soluções para esses problemas de desperdício de energia pneumática dentro de uma empresa de médio porte e apresenta como resultado um *case* com apontamento de ações que podem gerar cerca de até 70% de economia de energia elétrica consumida pelo compressor utilizado no processo produtivo da unidade de análise, além de significativos ganhos financeiros para as empresas que utilizam esse sistema.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Energia Pneumática, Sustentabilidade.

¹ Engenharia em Energia e Desenvolvimento Sustentável. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Novo Hamburgo, RS.

² Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

ABSTRACT

Many companies do not realize actions aimed at maintaining the quality of compressed air, causing it to produce a lot of pneumatic energy that is available and that it ends up being lost in leaks. This work is a study focused on the applicability of solutions to these pneumatic energy-wasting problems within a medium-sized company and presents results in a case with pointing actions that can generate about up to 70% energy saving consumed by the compressor used in the production of the unit of analysis process with significant financial gains for companies using this system.

Keywords: Energy Efficiency, Pneumatic Energy, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, dentre as formas de energia secundárias existentes no planeta, é a mais flexível, a mais eficiente e a mais pura. Porém, como sua produção vem se tornando cada vez mais complexa e dispendiosa, é necessário que o usuário se conscientize da necessidade de utilizá-la da maneira mais eficiente possível, reduzindo ao máximo as perdas e os desperdícios. Essa atitude pode ser considerada como um exercício de cidadania.

A utilização do ar comprimido como insumo e vetor energético é larga e intensamente difundida nas indústrias. Atualmente, a produção dessa utilidade industrial é diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica. Pode-se até dizer que o ar comprimido é o ar eletricamente capacitado a realizar trabalho, ou seja, perda de ar comprimido significa perda de energia elétrica.

Cada vez mais empresas investem em sistemas de ar comprimido para abastecerem seus processos produtivos, seja para o auxílio de apenas algumas tarefas como limpeza, exaustão e movimentação de equipamentos, ou até mesmo para tarefas principais e robustas, como o uso de ferramentas manuais. Hoje podemos encontrar pistolas de pintura, lixadeiras, furadeiras, parafusadeiras, rebidadeiras, emassadeiras e demais ferramentas manuais que funcionam somente através de ligação pneumática. Sistemas de geração e distribuição ao longo dos setores produtivos são instalados visando disponibilizar tal energia para que os funcionários realizem as suas tarefas. Entretanto, o uso desse sistema, que inicialmente se trata de uma grande vantagem financeira, com o passar dos anos, acaba por ser um dos grandes vilões do desperdício financeiro e de energia elétrica.

Grande parte das empresas não realiza ações voltadas à manutenção da qualidade do ar comprimido, da eliminação de vazamentos, da substituição de conexões mais eficientes, etc. Isso faz com que o sistema pneumático produza ar comprimido em excesso (consumo de eletricidade), que acaba não sendo utilizado, pois mais da metade é perdida em vazamentos na rede ou em fugas através de ferramentas que, por falta de treinamento dos operadores e de melhorias do sistema, permanecem conectadas as mangueiras pneumáticas mesmo em modo inoperante.

Um estudo focado na aplicabilidade de soluções para esses problemas apresenta possibilidades de geração de economia de energia elétrica e de ganhos financeiros para as empresas que utilizam esse sistema, bem como possibilita a qualificação dos profissionais envolvidos.

Nesse trabalho, analisou-se os equipamentos, as instalações e os consumos atuais de energia elétrica e de ar comprimido dentro de uma empresa de médio porte do setor metal mecânico automotivo, localizada na região metropolitana de Porto Alegre/RS.

A referida empresa é especializada na realização de projetos, na fabricação e manutenção de unidades móveis especiais (UMEs) e de implementos rodoviários para uso industrial, comercial e particular. Possui 24 anos de experiência no mercado, atua em um parque industrial de 35 mil m², sendo 2,5 mil m² em área coberta. Essas instalações e a tecnologia de ponta de que dispõe fazem parte fundamental do processo de fabricação de seus produtos, sendo uma das responsáveis diretas pela sua qualidade e agilidade, traduzida perfeitamente no compromisso de atender e superar as expectativas de seus clientes.

A fabricação de UMEs é o serviço de destaque dessa empresa, no entanto, fabrica também unidades para transporte de matérias primas e produtos acabados para movimentação interna em parques industriais, além da instalação de plataformas hidráulicas elevatórias, terceiro e quarto eixos, bem como manutenção rodoviária geral na área de mecânica, estrutural, elétrica, hidráulica, pneumática e pintura de todos seus produtos e demais equipamentos rodoviários.

A forma de trabalho industrial utilizada há 24 anos permanece a mesma, ou seja, a energia que impulsiona todo maquinário ferramental utilizado por todo o setor produtivo é a energia pneumática.

Essa fonte de energia cinética é muito importante para esses setores produtivos, pois proporciona uma agilidade, funcionalidade e economia significativa para as empresas. Contudo, a ausência de implantação de melhorias desse sistema, apresenta-se como um problema frente aos avanços tecnológicos, associada ao fato de não haver uma equipe de profissionais treinada para monitorar e garantir o bom funcionamento desse sistema ao longo dos anos, fazendo com que ocorra muitos vazamentos de ar, ocasionando maior funcionamento do compressor, maior consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, maior custo operacional para a empresa.

Acredita-se que esse problema ocorra com frequência também em outras empresas, pois a maioria dos estabelecimentos se preocupa em realizar somente as melhorias pontuais, não contribuindo com a realidade de operação do processo produtivo, fazendo com que não se garanta uma economia contínua e sim um ciclo que se renova com o passar dos meses/anos, onde o sistema pneumático volta a se tornar obsoleto por abandono de manutenções e de conhecimento da funcionalidade e dos ganhos/perdas financeiros por ele proporcionado.

Esse trabalho apresenta resultados que elucidam essa problemática, bem como sua análise e embasamento técnico/matemático sobre tais efeitos energéticos e financeiros, demonstrando que o controle e monitoramento desse sistema podem ser alcançados, garantindo sustentabilidade e competitividade para empresas que utilizam desses recursos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um trabalho focado na análise dos problemas de desperdício de energia pneumática em instalações de sistemas pneumáticos para as empresas que utilizam ferramentas manuais, identificando meios de somá-los buscando a eficiência energética dos mesmos com a linguagem necessária para que os resultados obtidos sejam alcançados com facilidade a partir deste estudo, contribuindo assim para a sustentabilidade.

2.2 Objetivos específicos

- identificar os desperdícios energéticos oriundos de falta de manutenção preventiva em instalações pneumáticas para uso de ferramentas manuais;
- identificar soluções desses desperdícios visando a eficiência energética e a sustentabilidade do sistema pneumático;
- estimar possíveis ganhos energéticos a partir da execução das alterações propostas neste estudo;
- demonstrar as economias financeiras obtidas com a execução das alterações propostas neste estudo;
- apresentar uma média de valores do investimento inicial estimando o tempo para retorno desse investimento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Compressores

De acordo com Rodrigues (1991), os compressores são máquinas que têm por objetivo proporcionar um aumento de pressão de um determinado volume de ar e/ou gás, admitido nas condições atmosféricas, a fim de atender a vazão e a pressão de consumo solicitado.

Dentre os tipos de compressores, cumpre esclarecer que o compressor dinâmico é caracterizado por possuir dois componentes geradores de aumento de pressão: o rotor e o difusor. Já o compressor volumétrico, também conhecido como compressor de deslocamento positivo, eleva a pressão, pela redução de volume de um ar e/ou gás, de forma mecânica, sendo acionado pela transmissão de energia da fonte externa, como, por exemplo, a partir de um motor elétrico acoplado, adquirindo-se assim, velocidade e outra parte em forma de temperatura e pressão. Em conjunto com o difusor, ocorre a transformação da energia cinética em aumento de pressão. A divisão geral dos compressores de ar tipo volumétricos e dinâmicos é apresentada na Figura 1.

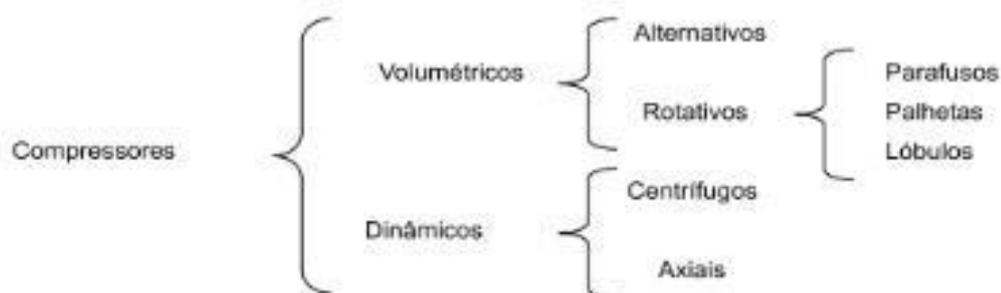


Figura 1: Tipos de compressores (MARQUES, 2006, p. 444)

Esclarece-se que um compressor rotativo de parafusos, que se trata de um compressor volumétrico utilizado no processo produtivo da unidade de estudo, conforme Rocha e Monteiro (2005), consiste em dois rotores montados em paralelo, denominados macho e fêmea, dentro de uma carcaça. O rotor macho recebe a energia motriz externa e o rotor fêmea é acionado pelo movimento transmitido pelo primeiro. O ar succionado é aprisionado no espaço entre os rotores, o qual vai diminuindo ao longo da trajetória do ar pelos rotores.

A Figura 2 apresenta os compressores de ar do tipo volumétrico rotativo de parafuso da marca Ingersoll-Rand instalados na empresa.



Figura 2: Compressores de ar do tipo parafuso da marca Ingersoll-Rand.

Ainda, Rocha e Monteiro (2005) e Martins et al. (2010) ressaltam que atuar na diminuição da temperatura de admissão de ar em um compressor contribui para um

ganho de potência economizada, pois aumenta a taxa de massa de ar admitida e assim proporciona um melhor rendimento volumétrico. Com o ambiente mais condicionado também há preservação do equipamento, ocasionado, por exemplo, pela diminuição da temperatura de descarga do ar e diminuição da temperatura do óleo lubrificante.

3.2 Reservatório de Ar Comprimido

O reservatório de ar comprimido é denominado como vaso de pressão, que, conforme Groehs (2002), são todos aqueles recipientes, de qualquer tipo, dimensões ou finalidade, não sujeitos à chama, destinados ao processamento de líquidos e gases sob pressão interna e externa. O projeto e construção de tais reservatórios estão ligados a uma série de procedimentos especiais de projeto, fabricação, montagem e testes a fim de atender as normas regulamentadas vigentes.

Segundo Rocha e Monteiro (2005), as principais funções do reservatório de ar comprimido em uma planta industrial são:

- estabilizar flutuação de pressão da rede de ar comprimido. Esta pode ser decorrente da vazão pulsante dos compressores do tipo pistão. No caso de compressores parafusos não há grande variação, pois a compressão é contínua; e
- coletar condensado do ar comprimido. Parte do calor gerado na compressão do ar é retirado e cedido ao meio que envolve o reservatório pelas superfícies externas e então o ar é resfriado e o vapor da água é condensando e acumulado no fundo com posterior drenagem manual e/ou automática.

A Figura 3 apresenta os reservatórios de ar comprimido instalados na empresa, cujas capacidades de armazenamento são de 500 litros e de 435 litros respectivamente.



Figura 3: Reservatórios de ar comprimido.

3.3 Tubulações Industriais

Conforme Telles (2005), os tubos são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos, sendo de maior aplicação os de seção circular, apresentando-se como cilindros ocos. Afirma-se que a maioria dos tubos funciona como conduto forçado, isto é, sem superfície livre, com o fluido tomando toda a área transversal.

3.4 Vazão Normal

A vazão normal de um equipamento, denominada vazão volumétrica e/ou vazão livre, expressa a quantidade de massa de ar que está sendo movimentada a uma determinada umidade, temperatura e pressão (ROCHA; MONTEIRO, 2005). De acordo com a localização geográfica da instalação industrial, as condições se alteram, sendo assim determinantes para o dimensionamento das unidades geradoras de ar comprimido.

3.5 Vazamentos de Ar Comprimido

Considerando que as tubulações são os principais meios de fuga de ar, pode-se afirmar que atuações em vazamentos de ar comprimido, através de inspeções de rotina, sendo por meios de inspeções visuais e/ou ensaios de ultrassom, assim como a elaboração de ferramentas de controle monitorada, refletem

significativamente na redução de até 40% do consumo elétrico (PERRONE et al., 2001).

Ressalta-se ainda que, de acordo com Zapellini (2008) e Atlas Copco (1976), os vazamentos devem ter manutenção sistemática para evitar perda de potência de geração perdida de ar comprimido.

3.6 Perda de Carga

A perda de carga é a perda de energia que o fluido apresenta nas tubulações. Assim, segundo Rocha e Monteiro (2005), um bom sistema de distribuição de ar comprimido deve atender os seguintes critérios:

- perda máxima de pressão para o ponto mais afastado do compressor a ser alimentado de 0,3 bar;
- tubulações principais devem ter uma perda máxima de 0,02 bar para cada 100 m de tubo;
- tubulações secundárias devem ter perda máxima de 0,08 bar para cada 100 m de tubo;
- tubulações de acesso direto ao consumidor devem ter perda máxima de 0,2 bar para cada 100 m de tubo;
- mangueiras de alimentação de marteleiros, perfuratrizes, entre outros, devem ter perda máxima de 0,4 bar para cada 100 m de mangueira;
- elemento filtrante limpo, deve ter perda inicial de 0,12 bar e ao final de vida útil de 0,7 bar;
- filtros coalescentes devem ter perda de até 0,25 bar; Secadores de ar devem ter perda de até 0,14 bar.

3.7 Ferramentas Pneumáticas

Inicialmente, registra-se que a decisão pelo uso de ferramentas pneumáticas requer informação sobre as diferenças principais entre essas e outros tipos de ferramentas como, por exemplo, as ferramentas elétricas.

Em comparação a outros tipos de ferramentas, as ferramentas pneumáticas apresentam vantagens que as fazem particularmente ideais para certas áreas de aplicação. Uma operação industrial robusta, voltada para a utilização simultânea de várias ferramentas capazes de manipular ferros, aços, alumínio e madeiras em

geral é um exemplo dessas áreas, pois nesse exemplo tais ferramentas trabalham com ar sob pressão, que são transportados por dutos, trazendo mais segurança e simplicidade para os serviços em geral. Outra vantagem significativa é o fato de que ferramentas pneumáticas suportam sobrecarga sem estragar, diferentemente de ferramentas elétricas que aquecem com seu uso intenso, ocasionando a queima do equipamento.

Na Figura 4 e Figura 5, para facilitar a compreensão, são apresentados os atuadores pneumáticos contidos no sistema de distribuição de ar comprimido e que representam parte do seu consumo.



Figura 4: Ferramentas pneumáticas do tipo (1) grampeador pneumático, (2) martelete pneumático, (3) escovador pneumático, (4) furadeira pneumática, (5) parafusadeira tipo pistola, (6) rebiteira pneumática, (7) martelete p/ cortar rebite, (8) parafusadeira $\frac{3}{4}$, (9) lixadeira pneumática.

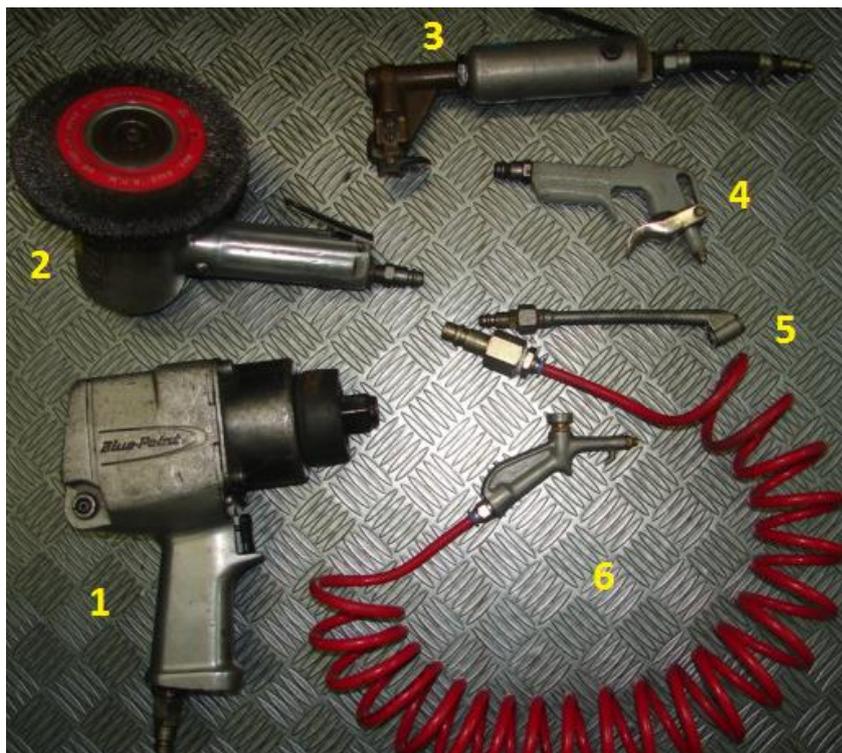


Figura 5: Ferramentas pneumáticas do tipo (1) parafusadeira $\frac{3}{4}$, (2) lixadeira pneumática, (3) tesoura pneumática p/ cortar chapas, (4) pistola de ar p/ limpeza, (5) bico de encher pneu, (6) mangueira extensora espiral.

A empresa unidade de análise faz uso dessas ferramentas diariamente em seus processos produtivos de manutenção, reparo, revisão e fabricação de componentes do setor rodoviário.

4 METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se um levantamento das características energéticas existentes na empresa por meio da identificação dos dados de consumo de eletricidade, de equipamentos e de enquadramento da empresa junto à distribuidora de energia elétrica local, bem como o mapeamento das instalações de geração, distribuição e consumo de energia pneumática utilizada para o funcionamento das ferramentas manuais utilizadas no processo produtivo.

Em seguida, realizou-se uma análise sobre o funcionamento dos compressores, reservatórios e de todas as tomadas de consumo de ar comprimido, quando tornou-se possível identificar problemas de desperdício de energia pneumática no processo produtivo da unidade de análise.

Para calcular o volume de ar comprimido desperdiçado por essa empresa, tomou-se como base os valores de pressão dos reservatórios de ar comprimido e de consumo de energia elétrica do compressor coletados por um *data logger* em intervalos de 10 segundos.

A partir dessa análise, mostrou-se possível apontar soluções para adequação de todo sistema pneumático, bem como identificar a necessidade de realização de consertos e de substituição de equipamentos defeituosos, sendo tais ações voltadas ao desperdício de energia.

Assim, o estudo apresenta resultados e análises de possíveis ganhos energéticos obtidos para o caso de execução das alterações propostas, bem como o cálculo de viabilidade da execução destas ações corretivas para melhoria e eficiência energética do uso da energia pneumática dentro da empresa estudada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados Energéticos da Empresa

A empresa utiliza energia da AES Sul. Está no grupo de consumidores horo sazonais tarifa verde, onde o consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia, na ponta e fora de ponta, e dos períodos do ano, período seco e período úmido são diferenciadas, além de um valor fixo para qualquer nível de demanda de potência contratada. Possui uma demanda contratada de 55 kW. A empresa não dispõe de geração própria de energia, controladores de demanda e banco automático de capacitores, sendo a correção do fator de potência indutivo feita através de um banco de capacitor fixo de 25 kVAr, o que acaba gerando um consumo de energia reativa capacitiva durante os períodos de intrajornada e interjornada, sendo entendido por período de intrajornada as pausas dentro da jornada diária de trabalho, e por período de interjornada a pausa concedida ao trabalhador entre duas jornadas diárias de trabalho.

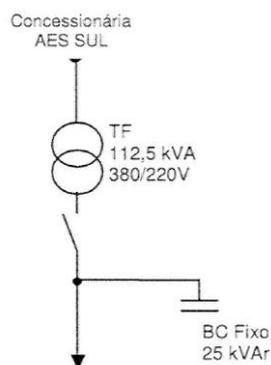


Figura 6: Diagrama unifilar da entrada de energia.

Os principais consumos de energia elétrica são para o acionamento de máquinas de solda, exaustão da cabine de pintura e geração de ar comprimido.

A empresa opera em apenas um turno de segunda à sexta-feira das 7h:30min às 12h:00min e das 13h:00min às 17h:18min, não operando em horário de ponta, apenas em eventuais jornadas de trabalho extra. No horário de ponta, o consumo de energia geralmente se concentra apenas em iluminação.

O consumo mensal de energia no horário fora de ponta, registrado nos últimos 12 meses, oscilou entre 6993 kWh e 10250 kWh. Na Tabela 1 estão demonstrados os consumos fora de ponta, consumos em ponta e demanda com os seus respectivos custos.

Tabela 1: Consumo fora de ponta, consumo em ponta e demanda.

Mês	Consumo Fora de Ponta			Consumo em Ponta			Demanda		
	kWh	R\$ (sem ICMS)	R\$ (com ICMS)	kWh	R\$ (sem ICMS)	R\$ (com ICMS)	kW	R\$ (sem ICMS)	R\$ (com ICMS)
mai/13	8177	1.125,99	1.356,62	749	669,77	806,95	48	696,22	838,82
jun/13	7524	1.083,99	1.306,01	702	478,05	575,96	50	612,11	737,48
jul/13	8007	1.232,95	1.485,48	706	513,85	619,10	51	654,23	788,23
ago/13	7216	1.104,88	1.331,18	546	395,16	476,10	40	650,53	783,77
set/13	7731	1.172,69	1.412,88	543	389,32	469,06	54	644,47	776,47
out/13	7979	1.197,11	1.442,30	608	431,17	519,48	47	637,44	768,00
nov/13	7615	1.147,67	1.382,74	420	299,19	360,47	45	640,32	771,47
dez/13	7727	1.144,29	1.378,66	365	255,49	307,82	55	629,19	758,06
jan/14	8644	1.267,78	1.527,45	393	272,44	328,24	62	702,44	846,31
fev/14	10250	1.516,63	1.827,27	483	337,80	406,99	56	640,07	771,17
mar/14	9291	1.319,41	1.589,65	503	337,63	406,78	60	658,20	793,01
abr/14	6993	993,07	1.196,47	335	224,86	270,92	49	603,35	726,93

Para os cálculos de economia financeira gerada nas ações propostas neste estudo, utilizou-se apenas o valor do kWh fora de ponta praticado em abril/14, que foi de R\$ 0,142. Este valor foi adotado, pois a concessionária teve o seu reajuste ano implementado neste mês e se usado uma média dos últimos 12 meses, o resultado ficaria distorcido. A Equação 1 apresenta o valor do kWh referente ao mês de abril/14.

$$\text{Valor}_{\text{kWh abril/14}} = \frac{\text{R\$ sem ICMS}}{\text{kWh de consumo fora de ponta}} = \frac{\text{R\$ 993,07}}{6.993 \text{ kWh}} = 0,142 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$$

Eq. (1)

Outras considerações que também são relevantes:

- não foi considerado o horário de ponta, pois o setor produtivo da empresa não opera neste período;
- também não foi considerado a demanda, pois as ações indicadas não refletem numa redução do seu valor sem que a empresa reduza a demanda contratada junto a concessionária de energia;
- e não foi considerado o ICMS porque a empresa deduz este valor.
- na Figura 7, é apresentado o consumo anual de energia entre o período de maio de 2013 a abril de 2014.

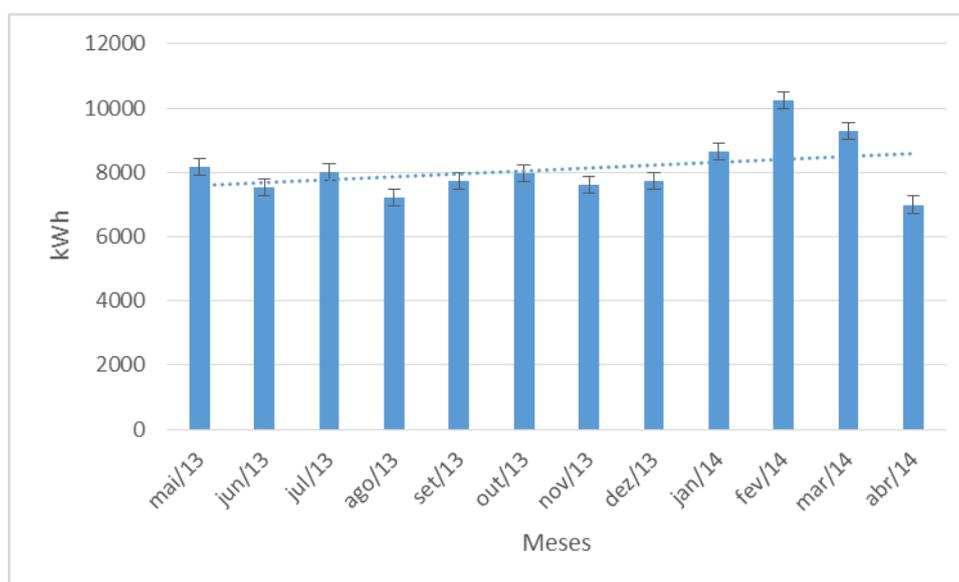


Figura 7: Consumo anual de energia elétrica.

5.2 Avaliações Realizadas

O sistema de ar comprimido é constituído por dois compressores de ar do tipo parafuso de 15 HP, um secador de ar por refrigeração, dois reservatórios ligados em paralelo sendo um com capacidade de 500 litros e o outro de 435 litros e uma rede de distribuição de mais de 400 metros de tubulação e com 48 tomadas de ar comprimido.

Os dois compressores disponíveis são da marca Ingersoll-Rand e possuem capacidades diferentes, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Capacidade dos compressores.

Modelo	Pressão		Vazão		Potência
	bar	Psi	m ³ /min	Pcm	HP
UP6-15C-125	8,6	125	1,55	55	15
UP6-15C-150	10,3	150	1,42	50	15

Os compressores estão instalados em local bem ventilado onde a temperatura de sucção do ar é praticamente igual à temperatura ambiente.

Atualmente, não há necessidade de funcionamento dos dois compressores, então, apenas o modelo UP6-15C-125 está sendo utilizado. O sistema de controle de carga do compressor é do tipo carga/vazio. Nesse sistema o compressor funciona de modo a manter o funcionamento contínuo do motor, evitando inúmeras paradas durante o seu funcionamento.

O comportamento da pressão e o funcionamento do compressor foram monitorados durante uma semana e apresentaram o mesmo comportamento todos os dias. Na Figura 8, demonstra-se os valores de pressão no reservatório durante um dia.

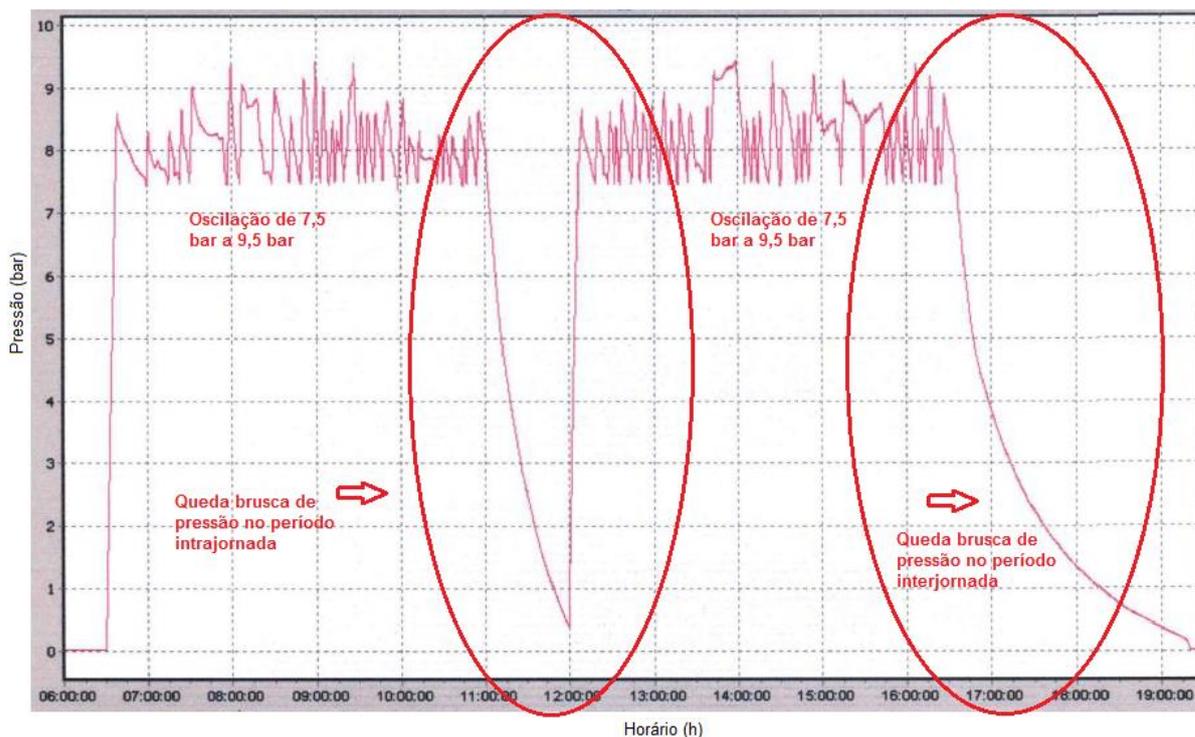


Figura 8: Pressão no reservatório de ar comprimido durante 1 dia.

Pode-se observar que a pressão de trabalho se mantém entre 7,5 e 9,5 bar durante a jornada de trabalho. Nos períodos de intrajornada e interjornada, quando o compressor está desligado, a pressão de trabalho diminui rapidamente, o que demonstra uma grande quantidade de vazamentos na rede de distribuição.

Também é possível perceber que a queda de pressão no intervalo intrajornada é mais brusca do que no período interjornada, demonstrando que há vazamento de ar nas ferramentas pneumáticas que permanecem conectadas nas tomadas de ar durante este período, sendo retiradas somente ao final do expediente diário de trabalho.

Ao analisar o consumo de energia elétrica do compressor, observa-se na Figura 9 que o consumo varia entre 9 kWh e 12 kWh. Essa variação ocorre porque este tipo de compressor possui um sistema de alívio que restringe a entrada de ar quando a pressão se aproxima do nível máximo de desligamento do pressostato. Desta forma, o compressor continua em funcionamento, mas comprimindo um volume menor de ar, mesmo assim podendo desligar pela atuação do pressostato.

Caso o consumo de ar seja maior do que o volume de compressão gerado na fase de alívio, ao chegar à pressão mínima, o compressor passará para sua carga máxima de compressão recuperando a pressão de trabalho.

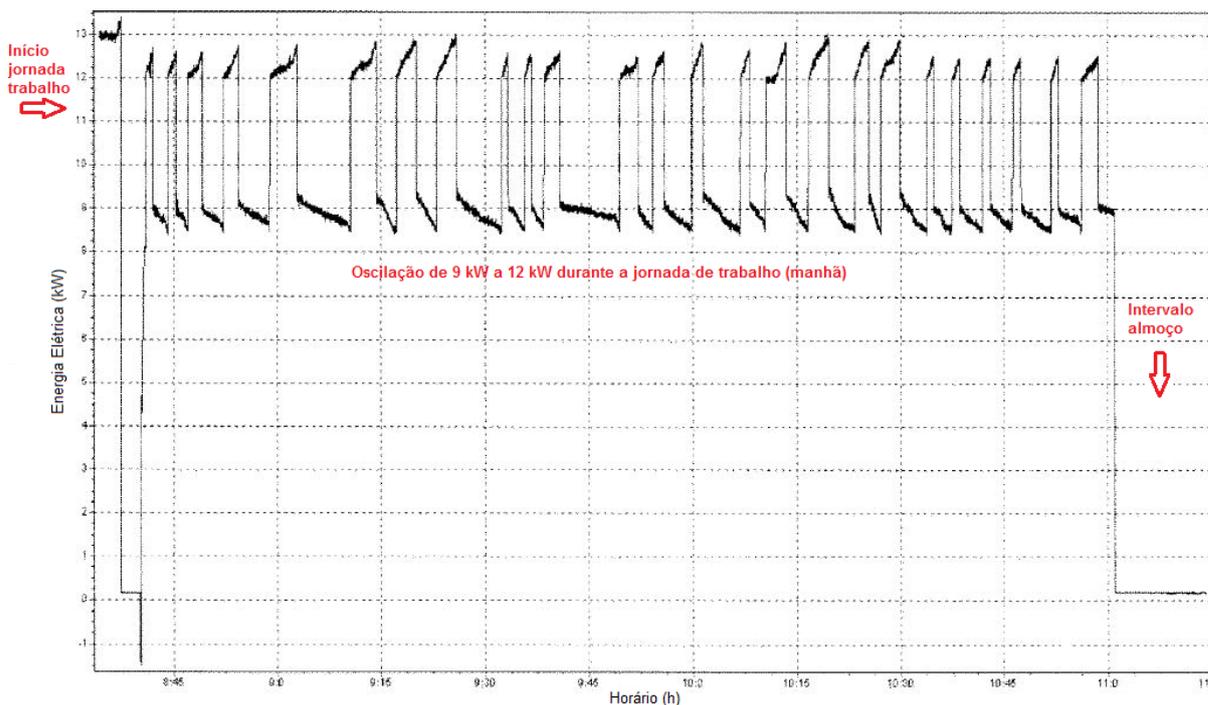


Figura 9: Consumo de energia elétrica do compressor.

A empresa demonstra especial preocupação com o consumo de energia gerado pelo compressor de ar, que atualmente corresponde a aproximadamente 24,5% do total de energia consumida durante o mês. Para verificar este valor, pode ser utilizado a Tabela 1 para fazer uma média diária do consumo nos últimos 12 meses e a Figura 9 para estimar o consumo diário do compressor. A seguir está demonstrado o cálculo, através das equações (2), (3) e (4).

$$\text{Consumo}_{\text{Médio da empresa}} = \frac{\text{kWh de consumo anual}}{12 \text{ meses}} = \frac{97.154 \text{ kWh}}{12 \text{ meses}} = 8.096 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Compressor}} = [(3\text{h e } 30\text{min} \times 12 \text{ kW}) + (5\text{h e } 20\text{min} \times 9 \text{ kW})] \times 22 \text{ dias} = 1.980 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\% \text{Consumo Compressor} = \frac{1.980 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \times 100}{8.096 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}}} = 24,5\% \quad \text{Eq. (4)}$$

No passado, algumas ações foram tomadas pela empresa visando uma melhor eficiência do sistema de ar comprimido, tais como:

- os compressores do tipo pistão foram substituídos por compressores do tipo parafuso que possuem um melhor rendimento;
- melhorias no sistema de distribuição de ar eliminando vazamentos.

5.3 Ações Propostas

Após o levantamento dos dados energéticos e de características de uso/consumo da energia pneumática nas ferramentas manuais utilizadas durante os processos produtivos da empresa, tornou-se possível apontar ações voltadas à eficiência energética e à redução de custos fixos operacionais para a empresa.

5.3.1 Ação 1: Eliminar Vazamentos na Rede de Distribuição de Ar e nas Ferramentas Pneumáticas

Pode-se afirmar que o sistema de geração de ar comprimido é um dos principais responsáveis pelo desperdício de energia nas empresas, isso acontece, principalmente, devido à grande quantidade de vazamentos existentes nas redes de distribuição.

Para calcular o volume de ar desperdiçado nesta empresa, tomou-se como base os valores de pressão coletados por um *data logger*, que coletou esses dados em intervalos de 10 segundos. Como referência, utilizou-se os valores indicados no período intrajornada da empresa, pois neste momento o compressor é desligado e não existe nenhum equipamento pneumático acionado, portanto, toda a queda de pressão durante esse período é considerada como vazamento.

Nesse período, pode-se observar na Figura 8 que a queda de pressão de 8 até 5,5 bar é praticamente linear. Sabendo-se que o volume entre reservatórios e rede de distribuição é de aproximadamente 1,6 m³, foi possível calcular o volume de ar contido no reservatório a uma pressão de 8 bar e depois o volume contido a uma pressão de 5,5 bar. O volume de ar desperdiçado durante esta queda foi de aproximadamente 4m³. Como essa queda teve uma duração de 9 minutos, concluiu-se que durante uma hora de trabalho, a queda é de aproximadamente 27 m³.

Considerando o desperdício durante a jornada de trabalho diária, que é de 8h e 48min, adicionando a perda de volume do reservatório no período intrajornada e interjornada, o desperdício total pode chegar a 263 m³/dia. Como a capacidade de vazão do compressor, segundo informações do fabricante, é de 1,55 m³/min, são

necessários, diariamente, 2h e 50min de funcionamento do compressor em plena carga para suprir o ar desperdiçado.

Como pode ser constatado na Figura 9, o compressor trabalha em média 3h e 30min em plena carga com uma vazão de $1,55 \text{ m}^3/\text{min}$ e 5h e 20min em alívio com vazão de $0,37 \text{ m}^3/\text{min}$ com uma produção média diária de ar comprimido é de 444 m^3 . Através destes números, chega-se à conclusão que os vazamentos representam 59% do total de ar comprimido produzido, conforme pode ser visto pela Tabela 3 e Tabela 4, bem como as Equações (5), (6), (7), (8) e (9).

Tabela 3: Volume atual dos reservatórios + rede de distribuição.

Volume dos reservatórios (500 litros + 435 litros)	935 litros
Volume aproximado da rede de distribuição	
6 metros de tubos de 2'	45 litros
117 metros de tubos de 1' 1/2''	530 litros
50 metros de tubos de 1'	90 litros
Total	1600 litros = $1,6 \text{ m}^3$

Tabela 4: Volume diário de ar desperdiçado.

Volume do reservatório a 8 bar (1,6 x 8)	$12,8 \text{ m}^3$
Volume do reservatório a 5,5 bar (1,6 x 5,5)	$8,8 \text{ m}^3$
Volume desperdiçado em 9 min	4 m^3
Volume_{Desperdiçado por hora} = $\frac{4 \text{ m}^3 \times 60 \text{ min}}{9 \text{ min}}$	$27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Desperdício durante jornada de trabalho ($27 \text{ m}^3/\text{h} \times 8 \text{ h} + 48 \text{ min}$)	238 m^3
Desperdício na intrajornada e interjornada ($1,6 \text{ m}^3 \times 8 \text{ bar} \times 2 \text{ períodos}$)	25 m^3
Total	$263 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$

$$\text{Tempo}_{\text{Funcionamento do motor para suprir o desperdício}} = \frac{263 \text{ m}^3}{1,55 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 170 \text{ min} = 2 \text{ h e } 50 \text{ min}$$

Eq. (5)

$$\text{Volume}_{\text{Diário de ar comprimido de regime em carga}} = 3 \text{ h e } 30 \text{ min} \times 1,55 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 325,5 \text{ m}^3$$

Eq. (6)

$$\text{Volume}_{\text{Diário de ar comprimido de regime em alívio}} = 5\text{h e } 20\text{min} \times 0,37 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 118,4 \text{ m}^3 \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\text{Volume}_{\text{Diário de ar comprimido total}} = 443,9 \text{ m}^3 \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\% \text{Vazamento} = \frac{263 \text{ m}^3 \times 100\%}{444 \text{ m}^3} = 59,2\% \quad \text{Eq. (9)}$$

Frente a este cenário, se for reduzido os vazamentos em até 90%, a economia de energia elétrica não representaria um valor significativo, apesar do volume de desperdício de ar ser bastante elevado, pois como o atual regime de trabalho do compressor é carga/alívio, o compressor ficaria aproximadamente 98% do tempo em alívio consumindo uma potência elétrica de 9 kW e produziria uma vazão de ar de apenas 0,37 m³/min, pois ao se considerar um consumo linear, após a eliminação de 90% dos vazamentos, a média de consumo de ar seria de 0,39 m³/min, ou seja, para suprir este consumo, o compressor ficaria aproximadamente 2h em alívio até que a pressão diminua para 7,5 bar e depois ficará 1,5 min em carga para atingir 9 bar novamente. Esses valores podem ser verificados nos cálculos das Equações (10), (11), (12), (13), (14) e (15).

$$\text{Redução}_{\text{Desperdício}} = 263 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \times 90\% = 236,7 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Futuro}} = \left(\frac{444 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} - 236,7 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}}{\frac{8,8 \text{ horas}}{60\text{min}}} \right) = 0,39 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$\text{Volume}_{\text{Consumido na queda de pressão}} = (1,6 \text{ m}^3 \times 9 \text{ bar}) - (1,6 \text{ m}^3 \times 7,5 \text{ bar}) = 2,4 \text{ m}^3 \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Queda de pressão}} = \frac{2,4 \text{ m}^3}{\left(0,39 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} - 0,37 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)} = 120\text{min} = 2\text{h} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Reposição da carga}} = \frac{2,4 \text{ m}^3}{1,55 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 1,55 \text{ min}$$

Eq. (14)

$$\text{Percentual}_{\text{Tempo de alívio}} = \frac{120 \text{ min} \times 100\%}{120 \text{ min} + 1,55 \text{ min}} = 98,7\%$$

Eq. (15)

A Tabela 5 demonstra a economia de energia gerada no período de um ano, considerando a tarifa de energia sem ICMS empregada atualmente pela concessionária de energia.

Tabela 5: Economia de energia gerada no período de um ano.

Dias de operação	Volume de ar comprimido (m ³)		Consumo kWh/m ³		Consumo kWh		Custo R\$	
	Atual	Futuro	Atual	Futuro	Atual	Futuro	Atual	Futuro
	260	115.414	53.898	0,20	0,38	23.400	20.673	3.322,80

Como pode-se observar a economia anual gerada é de apenas R\$ 287,29.

5.3.2 Ação 2: Instalação de Mais Um Reservatório de Ar e Alteração no Regime de Trabalho do Compressor

Atualmente o compressor funciona em regime contínuo carga/alívio, conforme recomendado pelo fabricante para os casos onde o número de partidas é superior a 6 vezes por hora. Com a eliminação de 90% dos vazamentos e a instalação de mais um reservatório de 500 litros que a empresa já possui, o regime de funcionamento pode ser alterado para o sistema de partida/parada controlada somente pelo pressostato.

Desta forma, a economia total de energia representaria 71% do total de energia elétrica consumida atualmente pelo compressor, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6: Percentual de economia.

Volume diário de ar comprimido atualmente	444 m ³
Volume atual dos reservatórios + rede de distribuição	1,6 m ³
Volume diário de ar desperdiçado	263 m ³
Volume diário de ar necessário, considerando redução de 90% nas perdas	
Volume atual (444 m ³) - Volume desperdiçado (263 m ³)	208 m ³
Consumo de energia anual do atual regime de trabalho	
[(3h e 30min x 12 kW) + (5h e 20min x 9 kW)] x 260 dias	23.400 kWh
Tempo de funcionamento do motor a 100% para recuperar a carga	
Volume do reservatório a 9,5 bar (2,1 x 9,5)	19,95 m ³
Volume do reservatório a 7,5 bar (2,1 x 7,5)	15,75 m ³
$\text{Tempo}_{\text{Repor carga}} = \frac{\text{Volume}_{\text{Para repor a carga}}}{\text{Vazão}_{\text{Do compressor}}} = \frac{4,3 \text{ m}^3}{1,55 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}$	2,71 min
Número de partida por dia para recuperar a carga	
$\text{Número}_{\text{Partidas}} = \frac{\text{Volume}_{\text{diário de ar necessário}}}{\text{Volume}_{\text{para repor carga}}} = \frac{208 \text{ m}^3}{4,2 \text{ m}^3}$	50 partidas
Consumo de energia anual no sistema partida/parada	
$\text{Consumo} = \frac{(2,71 \text{ min} \times 50 \text{ partidas})}{60 \text{ min}} \times 12 \text{ kWh} \times 260 \text{ dias}$	7.046 kWh
Percentual de economia	
$\% \text{ Economia} = 100\% - \left(\frac{7.046 \text{ kWh} \times 100\%}{23.400 \text{ kWh}} \right)$	70%

Tabela 7: Economia de energia gerada no período de um ano.

Dias de operação	Consumo		Custo R\$	
	kWh			
	Atual	Futuro	Atual	Futuro
260	23.400	7.046	3.322,80	1.000,53

Observa-se que a economia anual gerada é de R\$ 2.322,27.

5.3.3 Ação 3: Mudar o Intervalo de Liga e Desliga do Compressor

Constatou-se durante o processo de diagnóstico que as ferramentas pneumáticas necessitam de no máximo 6 bar para executarem o seu trabalho.

Considerando que hoje o compressor está operando de 7,5 a 9,5 bar, caso fosse realizada uma redução nesta fase de operação para 6,5 a 7,5 bar, poderia se ter mais uma redução do consumo de energia, que representaria aproximadamente 9,5%.

Porém, não recomenda-se que esta ação seja tomada de forma isolada, pois devido a grande quantidade de vazamentos existentes atualmente, a queda de pressão no final da linha acaba sendo elevada, ficando abaixo dos 6 bar recomendado pelos fabricantes das ferramentas pneumáticas.

Após as ações 1 e 2 serem tomadas, o consumo de energia ficaria em 7.046 kW/ano, que, ao se aplicar o percentual de 9,5%, importaria em uma economia de 669,37 kW/ano.

Tabela 8: Economia de energia gerada no período de um ano.

Dias de operação	Consumo		Custo R\$	
	kWh			
	Atual	Futuro	Atual	Futuro
260	7.046	6.376,63	1.000,53	905,48

Observa-se que a economia anual gerada é de apenas R\$ 95,05.

Registra-se que a economia de energia deste estudo é representativa, porém o recurso financeiro oriundo desta atividade não é expressivo, representa em torno de duas faturas de energia por ano, mas o ganho para o sistema elétrico passa a ser interessante, pois esta empresa está localizada no centro de uma cidade onde há uma série de outros consumidores que carregam o sistema. A tabela 9 mostra a evolução dos índices a serem alcançados.

Tabela 9: Evolução dos índices conforme as ações a serem executadas.

Ação	Economia anual estimada		Investimento Previsto (R\$)	Tempo de Retorno do Investimento (meses)
	kWh	R\$		
1	2.727,4	287,29	2.000,00	83,5
1 e 2	16.354	2.609,56	3.500,00	16,1
1, 2 e 3	17.023,37	2.704,61	3.600,00	15,9

O tempo de retorno do investimento foi calculado utilizando a Equação 16.

$$\text{Tempo}_{\text{Retorno investimento}} = \left(\frac{\text{Investimento em R\$}}{\text{Economia em R\$}} \right) = 1,33 \text{ anos} \quad \text{Eq. (16)}$$

Como pode ser visto na tabela 9, com as três propostas sendo tomadas em conjunto, mostra-se possível obter uma economia de aproximadamente 70% do total de energia consumida pelo compressor, que atualmente é de 24.300 kWh. A tabela ainda informa que o custo estimado para a realização dessas ações é em torno de R\$ 3.600,00, sendo que esse valor apresenta um prazo de retorno do investimento de aproximadamente 1 ano e 4 meses, conforme equação 16.

Para que essas ações tenham um resultado contínuo à empresa precisa cumprir com maior rigor as suas rotinas de manutenção para as mangueiras, lubrificar e engate rápido, evitando assim que os vazamentos voltem a ocorrer.

6 CONCLUSÕES

Competitividade é a capacidade que uma empresa tem de formular e implementar estratégias que lhe permitem uma condição privilegiada perante às demais empresas e uma posição sustentável no mercado. A eficiência energética atua no sentido de combate ao desperdício energético proporcionando uma redução de custo fixo para as empresas que utilizam dessas técnicas, tornando-as mais competitivas.

Este estudo apresentou dados reais de uma utilização de energia pneumática para manuseio de ferramentas pneumáticas diversas em seus processos produtivos. Destaca-se o grau de importância desse estudo frente ao problema que motivou a execução desse trabalho, uma vez que os resultados apresentados demonstram a falta de conhecimento técnico sobre as instalações pneumáticas e as perdas energéticas e financeiras ocasionadas pelo abandono total dos cuidados que tais utilizações demandam.

Entende-se que esses dados facilmente podem ser encontrados em outras empresas da região metropolitana de Porto Alegre e demais regiões do estado e do país. A falta de conhecimento e monitoramento por parte das empresas, bem como

a falta de interesse de profissionais do setor pneumático em acompanhar a instalação e garantir o seu perfeito funcionamento ocasionam esses dados apresentados.

Esse trabalho também identificou que para solucionar tais problemas energéticos é necessário um envolvimento técnico e próximo às empresas, pois para se obter argumentos válidos para convencimento dos empresários da importância de realização das manutenções preventivas, o que muitas vezes não é possível por demandar um desgaste destes profissionais.

Para a solução de tal problema, sugere-se o uso de tecnologias de informações, fazendo com que os dados levantados nesse trabalho sejam obtidos continuamente através de sensores e painéis de auxílio para a tomada de decisões empresariais. Com essa providência, os empresários somente estariam de frente ao impasse financeiro de investir ou não investir, e não mais da parte técnica desses problemas.

Hoje em dia as empresas buscam profissionais qualificados para atuarem em suas empresas, mas acabam esquecendo que muitas vezes o simples uso e investimento em novas tecnologias proporcionariam grandes resultados gerenciais para empresa.

Essa visão para o uso de tecnologias gerenciais poucos empresários têm, principalmente empresas de pequeno e médio porte, pois acreditam estar gastando dinheiro em algo que não seja imprescindível para o funcionamento do negócio. No entanto, isso ocasiona um problema gravíssimo de o conhecimento estar restrito as profissionais que atuam pela empresa e não o inverso.

Se as empresas mudassem essa visão de negócio poderiam estar formando profissionais internos e buscando a melhoria contínua de todos os seus processos, não dependendo assim de profissionais qualificados para compor a empresa e sim de serviços de terceiros para corrigir ou prevenir os resultados financeiramente negativos.

Por todo o exposto, conclui-se que o caminho para os profissionais da área de eficiência energética seja fazer uso de equipamentos tecnológicos para levar as informações aos seus clientes, pois assim mostra-se possível a formação de um mercado preparado para a atuação desses profissionais.

7 OBSERVAÇÕES FINAIS

Apesar de não fazer parte deste trabalho, percebeu-se outras ações que poderão ser tomadas pela empresa, visando à economia de energia e um melhor enquadramento no sistema de tarifação, conforme segue:

- realizar um diagnóstico no sistema de exaustão/ventilação da cabine de pintura que é composta por 6 motores de 5 CV;
- automatizar o sistema de correção de fator de potência, que hoje é composto por um banco de capacitores fixo, que acaba gerando um consumo de energia reativa/capacitiva no período de interjornada da empresa;
- avaliar após realizar as ações indicadas como melhoria no sistema de ar comprimido a possibilidade de reduzir a demanda contratada, que hoje é de 55 kW, mas nos últimos 12 meses, somente em três meses chegou a 56 kW, 60 kW e 62 kW, nos demais meses a demanda oscilou entre 40 kW e 55 kW.

8 REFERÊNCIAS

ATLAS COPCO. **Manual do Ar Comprimido**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. 479 p.

GROEHS, Ademar Gilberto. **Resistência dos Materiais e Vaso de Pressão**. São Leopoldo: UNISINOS, 2002. 796 p.

KAESER Compressores do Brasil Ltda, Disponível em: <http://www.kaeser.com.br/Online_Services/Toolbox/Leaks/default.asp>. Acesso em: 15 out. 2014.

MARQUES, M.C.S., HADDAD, Jamil, MARTINS, A. R. S. **Conservação de Energia**, Itajubá: Eletrobrás Procel Educação / FUPAI, 2006, 597 p.

MARTINS, Alin do A. et al. **Procedimentos de Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido Industriais**. Trabalho apresentado no 9º Congresso IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, São Paulo, nov. 2010, postado no site Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LABPLAN. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5739926&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F5738180%2F5739850%2F05739926.pdf%3Farnumber%3D5739926>>. Acesso em: 15 out. 2014.

PERRONE, F.P.D.; AFONSO, S.; CAVALCANTI, E.S.C.; CAPELLA, P.S. A solução no caso DaimlerChrysler para a redução de consumo de energia em sistemas de ar comprimido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16. Anais... Campinas: SNTPEE, 2001.

ROCHA, C.R; MONTEIRO, M.A.G. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**, Itajubá: Eletrobrás Procel Educação / FUPAI, 2005, 208 p.

RODRIGUES, Paulo Sergio B. **Compressores Industriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Edc, 1991. 515 p.

TELLES, P.C.S. **Tubulações Industriais**: materiais, projeto, montagem. 10. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

ZAPPELINI, Alexandre Borges. **Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido**. 2008. 158f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008. Disponível em: <http://www.bdt.d.ufu.br//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1884>. Acesso em: 15 out. 2014.