



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO: ESTUDO DE CASO PARA UMA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO E PLÁSTICO

Edmar Meneghel¹

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler²

Richard de Medeiros Castro³

Resumo: O presente trabalho analisa tecnicamente uma instalação de ar comprimido em uma indústria de alumínio e plástico, demonstrando a situação atual do sistema, tendo maior ênfase na geração de ar comprimido e na quantidade de vazamentos existentes nos sistemas. A empresa possui três sistemas de geração e distribuição de ar comprimido, sendo que no setor de plástico encontra-se um compressor de ar de parafusos rotativos com princípio de carga e alívio, modelo GA55 C100P Atlas Copco. No setor de esquadria o sistema possui dois compressores de parafusos rotativos com velocidade variável modelo GA55 VSDff e CPB-30 VSD, fabricados pela Atlas Copco e Chicago Pneumatic, respectivamente e, no setor de extrusão encontra-se um compressor GA55 P100 também fabricado pela Atlas Copco. Os sistemas serão analisados separadamente e em períodos diferentes, em horário de expediente e com a produção parada. Durante todo esse período foi instalado um analisador de energia *Instrutherm mod. AE-200*, e os dados coletados foram compilados para o *software Excel*, assim pode-se analisar melhor a eficiência energética dos sistemas. Ao final desse trabalho pode-se quantificar o volume de ar comprimido desperdiçado pelos vazamentos, 33,33 % no setor de plástico, 22,22 % no setor de extrusão e no de esquadria 36,86 % do volume total produzido pelos compressores com um gasto anual de aproximadamente R\$ 125.000,00. Outro grande problema encontrado foi a quantidade de horas trabalhadas em alívio, mais de 50 %, no entanto o setor de esquadria não sofre com esse problema pelo fato dos compressores serem de velocidade variável.

Palavras-chave: Ar comprimido. Vazamento. Eficiência energética. Compressor.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil nos últimos anos vem enfrentando problemas no setor energético, demonstrando que a energia elétrica é um item imprescindível para o desenvolvimento econômico do país. A exigência de criar novos estudos, metodologias e aplicações que busquem a eficiência no uso da energia elétrica

¹Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica Faculdade Satc. E-mail:

mazinho_meneghel@hotmail.com

² Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor Faculdade Satc. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br

³ Mestre em Engenharia de Materiais/Metalurgia e Mecatrônica Industrial, Faculdade SATC. E-mail: richard.castro@satc.edu.br



foram comprovadas pela crise no abastecimento que se instalou no país no início do século XXI (TOLMASQUIM, *et al.*, 2007).

Por se tratar de um dos processos industriais que mais utilizam energia elétrica, os sistemas de ar comprimido requerem uma abordagem detalhada no consumo de energia pela produção racional e eficaz do sistema. Segundo (S.A. AIR SOLUTIONS, 2009), para cada unidade perdida de ar comprimido, estão sendo perdidas 6 a 8 unidades de energia elétrica, ou seja, para disponibilizar 1 CV de potência pneumática faz-se necessário consumir de 6 a 8 CV de potência elétrica. Por isso um estudo no sentido de diminuir desperdícios em sua utilização é de suma importância.

A eficiência energética nas instalações que envolvem o ar comprimido pode ser alcançada adotando-se medidas que se iniciam no projeto da planta, na especificação correta dos compressores, dos acessórios e periféricos, e um item muito importante que é a conservação do sistema com plano de manutenção a fim de evitar os vazamentos. Os vazamentos por sua vez, podem representar uma perda de até 30% da geração total em um sistema de ar comprimido.

Com base no contexto, este trabalho tem como principal objetivo analisar a eficiência energética de um sistema de ar comprimido em uma indústria de alumínio e plástico. Será analisado o volume de ar comprimido gerado pelos compressores, bem como a potência média, a quantidade de kwh gastos na geração e os custos que isso representa para a empresa.

Além de ser uma fonte de energia desperdiçada, os vazamentos também podem contribuir para outras perdas operacionais, como queda de pressão, baixo rendimento das ferramentas pneumáticas e conseqüentemente que na produção. Entretanto realizaremos o levantamento do volume de ar comprimido desperdiçados pelos vazamentos, a potência média utilizada pelos compressores para supri-los e os gastos que isso representa. Outro ponto que será avaliado são as quantidades de horas que os compressores trabalham em alívio, pois nesse modo de funcionamento, em alívio, os compressores ficam trabalhando sem gerar ar comprimido, mas consumindo energia, diminuindo assim a eficiência energética do sistema.



2.1 AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

O aumento da eficiência energética é uma tendência mundial. De acordo com o Protocolo de Quioto de 1997, as grandes potências mundiais precisam reduzir as emissões de gases causadores do efeito de estufa. Para alcançar essas reduções, esforços substanciais devem ser empreendidos em todos os setores das indústrias. Uma das importantes utilidades da indústria que tem de ser abrangida por esta política energética são os sistemas de ar comprimido.

A aplicação de ar comprimido tem uma tendência crescente devido à sua geração, manipulação e utilização fácil e segura. Nos anos anteriores, os esforços de pesquisa neste domínio concentraram-se no desenvolvimento e aplicação dos sistemas de ar comprimido, visando aumentar a produtividade independentemente do consumo de energia. Com uma maior conscientização dos custos energéticos e dos efeitos das emissões dos gases causadores do efeito estufa, recentemente foi dada atenção ao uso eficiente de energia utilizada por esses sistemas (SESLIJA, *et al.*, 2012).

2.2 COMPRESSORES

A escolha do compressor pode influenciar diretamente na eficiência energética do sistema. Existem dois tipos básicos de compressores, de deslocamento positivo (volumétrico) e dinâmico. O compressor de deslocamento positivo, uma quantidade de ar é aprisionada em uma câmara de compressão e o volume que ele ocupa é mecanicamente reduzido causando assim um aumento na pressão do sistema antes da descarga a uma velocidade constante. Entretanto, os compressores dinâmicos transmitem energia para um fluxo contínuo de ar por meio de impulsores rotativos em velocidades muito altas, sendo que essa energia de velocidade é transformada em energia de pressão (COMPRESSED AIR CHALLENGE, 2003).

Apesar da diversidade de compressores existentes, na maioria das aplicações em sistemas de ar comprimido são utilizados os de deslocamento positivo, de pistão ou de parafuso. Os compressores dinâmicos, centrífugos e axiais são mais utilizados



em sistemas de pressões menores, mas com vazões elevadas (ROCHA; MONTEIRO, 2005).

De acordo com (RADGEN, BLAUSTEIN, 2001), 75% dos compressores comercializados na União Europeia são do tipo de parafuso rotativo com injeção de óleo.

Ainda para Valadão (2014), os compressores de parafuso são do grupo dos compressores volumétricos rotativos e são empregados para baixas vazões, apresentam como vantagens o baixo custo de manutenção e operação em relação aos alternativos e possui maior relação peso versus potência.

2.2.1 Compressor de Parafuso com Velocidade Variável (VSD)

A utilização de unidades com alto rendimento aumenta a eficiência energética do sistema. A integração de variadores de velocidade (VSD) em compressores pode aumentar a eficiência energética em relação às características dos compressores de carga e alívio. A integração de controladores de velocidade (inversores de frequência) em sistemas de ar comprimido é uma medida muito rentável. Em salas de compressores onde são instalados vários compressores, os variadores de velocidade são integrados em apenas uma máquina que ajustam a produção de ar comprimido, conforme as necessidades instantâneas dos consumidores, em quanto isso, os compressores de carga e alívio trabalham em plena carga utilizando a energia de maneira mais eficiente sem entrar em alívio (SESLIJA, *et al.*, 2012).

2.2.2 Determinação da Potência Média dos Compressores

De acordo com Mousavi (*et al.*, 2014), o ar comprimido é uma das fontes mais caras de energia e, é utilizado em uma ampla gama de indústrias, sendo essencial para suprir as exigências do processo que empregam ferramentas e equipamentos pneumáticos. O ar comprimido é relativamente caro para ser gerado e consome uma grande parte da energia total utilizada nas indústrias. Por exemplo, na Austrália e países europeus, o consumo de energia dos sistemas de ar comprimido contribui com cerca de 10% do uso de energia industrial total, enquanto que nos EUA, representa até 30% do consumo total de energia.



Segundo Dindorf (2012), para calcular o custo de operação de um compressor alternativo, é necessário descobrir o seu consumo médio de energia.

Para compressores com sistema de controle *on/off* (liga/desliga), frequentemente utilizado por pequenos compressores alternativos, o equipamento liga automaticamente quando a pressão do sistema se encontra abaixo do valor ajustado, quando essa pressão excede o motor desligará, parando de consumir energia.

A potência média P_A determina o consumo médio de energia para esse tipo de sistema de controle, Equação (1).

$$P_A = \frac{P_L \cdot t_L}{t_L + t_{UL}} \quad [\text{kW}]$$

(1)

Onde:

P_A [kW]: potência média

P_L [kW]: consumo de energia durante o carregamento

t_L [h]: tempo total do carregamento

t_{UL} [h]: tempo total descarga

Nos compressores de carga/alívio o funcionamento é um pouco diferente. Quando a pressão do sistema está abaixo do ajustado, o compressor trabalha produzindo ar comprimido com a máxima eficiência até que a pressão de descarga atinge a pressão ajustada, fazendo com que feche a válvula de admissão parando de comprimir o ar atmosférico. Nesse momento o equipamento entra em alívio, não adicionando ar comprimido para o sistema, mas o motor continua a funcionar e consumindo energia elétrica. Normalmente, o consumo de energia em alívio é de 20% a 30% do consumo de energia em carga.

A Equação (2) é utilizada para determinar a potência média para o sistema de controle carga / alívio.

$$P_A = \frac{(P_L \cdot t_L) + (P_{UL} \cdot t_{UL})}{t_L + t_{UL}} \quad [\text{kW}]$$

(2)



Onde:

P_{UL} [kW]: consumo de energia em alívio

2.2.3 Cálculo do FAD do Compressor

Ainda para Dindorf (2012), pode-se calcular a entrega de ar do compressor FAD (*Free Air Delivery*), com a Equação (3):

$$Q_{FAD} = \frac{V(P_2 - P_1)}{P_N \cdot t} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

(3)

Onde:

Q_{FAD} [m^3/h]: entrega de ar do compressor

V [m^3]: volume de armazenamento

T_1 [K]: temperatura inicial do ar

T_2 [K]: temperatura final do ar

t [h]: tempo necessário para elevar a pressão de P_1 para P_2

P_1 [kPa]: pressão inicial

P_2 [kPa]: pressão final

P_N [kPa]: pressão normal

2.2.4 Consumo Específico de Energia

O consumo de energia em kWh para o volume em m^3 de ar entregue pelo compressor em condições ambiente é determinado como consumo específico de energia e pode ser encontrado através da Equação (4) (DINDORf, 2012).

$$SEC = \frac{P_A}{Q_{FAD}} \quad \left[\frac{kWh}{m^3} \right]$$

(4)

Onde:



SEC [kWh/m³]: consumo específico de energia

O custo de energia anual, utilizada pelos compressores na geração de ar comprimido, pode ser conhecido através das Equação (5) e (6) (DINDORF, 2012).

$$EC = P_A \cdot H \quad \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right]$$

(5)

$$AEC = EC \cdot ER \quad \left[\frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \right]$$

(6)

Onde:

EC [kWh/ano]: consumo anual de energia

H [h/ano]: horas em funcionamento anual

AEC [R\$/ano]: custo de energia anual

ER [R\$/kWh]: tarifa de energia

De acordo com Natural Resources Canada (2007), durante os dez primeiros anos de vida de um compressor de parafuso rotativo com dois turnos de operação, os custos operacionais com energia elétrica e manutenção serão equivalentes a cerca de 88% do custo total da vida útil, o custo do equipamento original e da instalação será responsável pelos 12% restantes, conforme Figura 1.

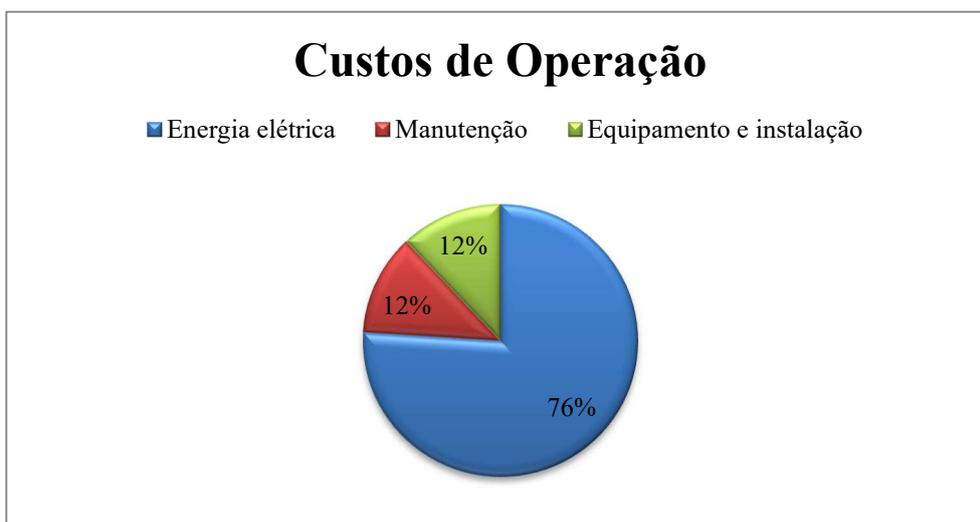


Figura 1: Custo de operação de um compressor de ar
Fonte: Adaptado de Natural Resources Canada, (2007).



Através da Figura 1, pode-se verificar que a energia elétrica representa cerca de 76% do custo operacional de um compressor, no entanto é imprescindível projetar e dimensionar um sistema de ar comprimido, bem como a geração, tratamento, distribuição e consumo, procurando adquirir componentes mais eficientes em especial os compressores de ar, para obter uma boa eficiência energética do sistema.

2.3 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Uma rede de ar comprimido corretamente dimensionada garante uma baixa perda de carga (queda de pressão) entre a geração e o consumo, resultando num suprimento de ar adequado aos usuários, além de uma significativa economia de energia. Para um bom desempenho de todo o sistema, não permita que os vazamentos ultrapassem 10% da vazão total do mesmo (METALPLAN, 2008).

É bastante comum nas instalações de ar comprimido nas indústrias não haver verificação e manutenção periódica das linhas de distribuição, por considerar perda de tempo parar a instalação para fazer a manutenção. Os vazamentos existentes, geralmente do conhecimento de todos, são negligenciados. Porém, estes podem assumir proporções muito significativas no consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, no custo final do ar comprimido (ROCHA; MONTEIRO, 2005).

2.3.1 Tubulação

Conforme Telles (2005), tubos são condutos fechados destinados principalmente para o transporte de fluídos, e são de seção circular em forma de cilindros ocos. Na grande maioria, funcionam como condutos forçados, isto é, sem superfície livre, com o fluído tomando toda a área de seção transversal.

2.3.2 Vazamentos

Os vazamentos podem ser uma fonte significativa de desperdício de energia num sistema de ar comprimido industrial, por vezes, o desperdício pode chegar em até 30% do volume total. Uma planta típica que não tenha sido bem conservada provavelmente terá uma taxa de fuga igual a 20% da capacidade total de produção



de ar comprimido, por outro lado, a detecção de fugas e reparos na rede, pode reduzir para menos de 10% o volume de desperdício (COMPRESSED AIR CHALLENGE, 2003).

Além de ser uma fonte de energia desperdiçada, os vazamentos também podem contribuir para outras perdas operacionais. Existe uma forte relação de causa e efeito entre o número e a magnitude dos vazamentos de ar com a pressão global do sistema de ar comprimido. Por exemplo, uma menor pressão do ar pode afetar as ferramentas e equipamentos de ar, reduzindo a saída mecânica e diminuindo a produtividade resultante do processo (NATURAL RESOURCES CANADA, 2007).

A Tabela 1 mostra o volume de ar, em (m³/h), que são desperdiçados através de determinados diâmetros de furos existentes na rede de distribuição, conseqüentemente uma potência extra é exigida do compressor para suprir esses vazamentos.

Tabela 1: Perdas de vazão e potência com vazamentos (Rocha e Monteiro, 2005).

Diâmetro do furo de vazamento [mm]	Escape de ar em a uma pressão de 6 bar [m ³ /h]	Potência em para suprir a vazamento [kW]
1	0,006	0,3
3	0,6	3,1
5	1,6	8,3
10	6,3	33,0
15	25,2	132,0

Fonte: Rocha e Monteiro (2005)

De acordo com Saidur *et al.*, (2010) pode-se determinar a taxa de vazamento em um sistema de ar comprimido através da Equação (7).

$$LR = \frac{t_L}{t_L + t_{UL}} \cdot 100 \quad [\%]$$

(7)

Onde:

LR [%]: taxa de vazamento

O volume de ar comprimido que é desperdiçado pelos vazamentos é obtido pela Equação (8) (MARTINS, *et al.*, 2010; DINDORF, 2012).



$$Q_L = Q_{FAD} \cdot \frac{LR}{100} \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

(8)

Onde:

Q_L [m^3/h]: volume de ar comprimido desperdiçado pelos vazamentos

A potência perdida pelos vazamentos pode ser encontrada conforme a Equação (9).

$$P_{LOS} = Q_L \cdot SEC \quad [kW]$$

(9)

Onde:

P_{LOS} [kW]: potência utilizada pelo vazamento

Para calcular as perdas de energia anuais devido aos vazamentos na instalação de ar comprimido, adota-se a Equação (10).

$$EL = P_{LOS} \cdot H_L \quad \left[\frac{kWh}{ano} \right]$$

(10)

Onde:

EL [kWh/ano]: perdas de energia anual

H_L [h]: horas de vazamento anual

Ainda para (MARTINS, *et al*, 2010; DINDORF, 2012), os custos anuais gerados pelos vazamentos podem ser encontrados da seguinte maneira:

$$CEL = EL \cdot ER \quad \left[\frac{R\$}{ano} \right]$$

(11)

Onde:

CEL [R\$/ano]: custo anual gerado pelo vazamento

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Os sistemas de ar comprimido serão analisados separadamente e em períodos diferentes, em horário de expediente e com a produção parada. Durante o horário de expediente será analisado a geração de ar comprimido m^3/h , a potência média utilizada pelos compressores durante a geração kW e as quantidades de horas trabalhadas em alívio. Para verificar o funcionamento dos compressores com a produção parada, fez-se necessário o acompanhamento do mesmo em horários noturnos e em finais de semanas. Esse procedimento foi necessário para quantificar os desperdícios de ar comprimido causados pelos vazamentos.

Durante todo esse período foi instalado um analisador de energia *Instrutherm mod. AE-200*, nos compressores e os dados coletados pelo analisador e pela IHM foram inseridos no computador e compilados para o *software Excel*, assim pode-se analisar melhor a eficiência energética dos sistemas, conforme Figura 2.



Figura 2: Sistema de aquisição de dados

3.1 CÁLCULO DE VAZÃO DOS COMPRESSORES (FAD)

Os compressores utilizados pela empresa possuem uma quantidade significativa de horas trabalhadas e passaram por várias intervenções mecânicas, elétricas e manutenções preventivas. Por esses motivos optou-se por calcular o



Q_{FAD} , utilizando a Equação (3), para comparar os resultados com os dados do fabricante existente nas placas de identificação de cada compressor. Será realizado esse procedimento somente nos compressores de carga e alívio dos setores de plástico e extrusão.

Para a aquisição dos dados além do analisador de energia foi utilizado um termômetro digital (mod. MHTE-986HI, fabricante *Kiltler*) e um cronômetro digital (mod. CL088, fabricante *Toppa*).

Tabela 2: Dados e cálculos das vazões dos compressores.

Cálculo das vazões dos compressores									
Compressor	P_1 [kPa]	P_2 [kPa]	P_N [kPa]	V [m ³]	T_1 [K]	T_2 [K]	t [h]	Q_{FAD} [m ³ /h]	Q_{FAD} Fáb.[m ³ /h]
GA55 C100P	0	740	98,06	0,5	301,15	311,15	0,0065	561,84	568,80
GA55 P100		730		0,51	307,15	317,15	0,0061	602,78	612,70
GA55 VSD _{ff}		-		-	-	-	-	-	621,36
CPB-30 VSD		-		-	-	-	-	-	212,40

Após a conclusão dos cálculos de vazão dos compressores, pode-se observar que os resultados ficaram próximos aos indicados pelos fabricantes, mostrado na última coluna da Tabela 2. Para o setor de plástico o volume calculado foi de 561,84 m³/h e o fornecido pelo fabricante é de 568,80 m³/h, já o compressor da extrusão o calculado foi de 602,78 m³/h e o fabricante indica 612,70 m³/h. Como se sabe, a vazão de ar de um compressor também está relacionada com a temperatura de admissão do ar, no entanto optou-se por utilizar os dados de cada fabricante para os cálculos posteriores.

3.2 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DOS COMPRESSORES

Com a utilização do analisador de energia *Instrutherm mod. AE-200* foram adquiridos os dados para a geração dos gráficos de funcionamento dos compressores, conforme Figuras 3, 4, 5 e 6. O analisador foi conectado a rede de alimentação elétrica de cada compressor, onde o mesmo adquiria as informações em períodos de 2 segundos. Após a aquisição dos dados, todas as informações foram compiladas para o *software Excel*.

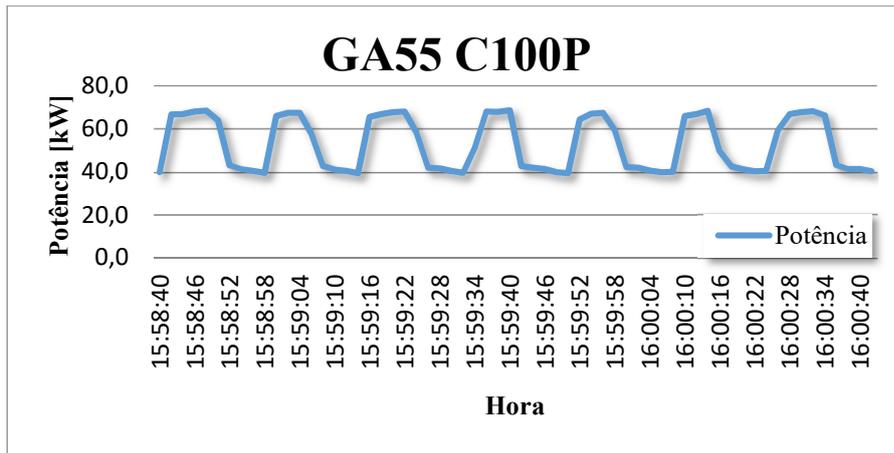


Figura 3: Funcionamento do compressor setor de plástico.

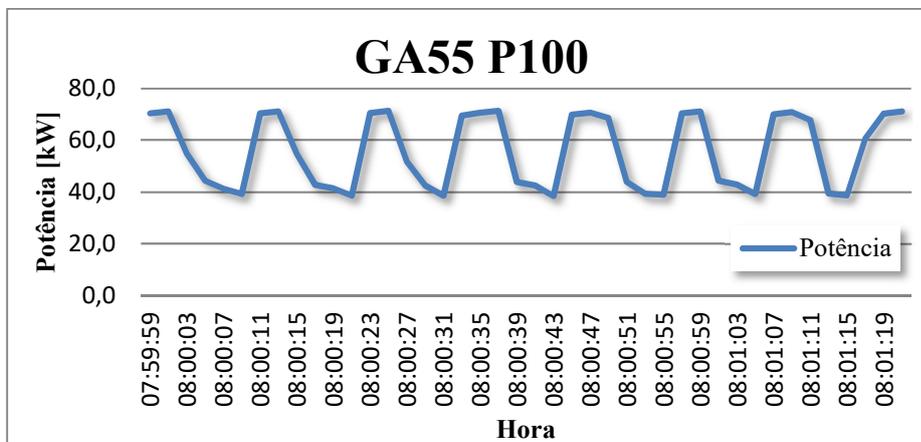


Figura 4: Funcionamento do compressor setor de extrusão.

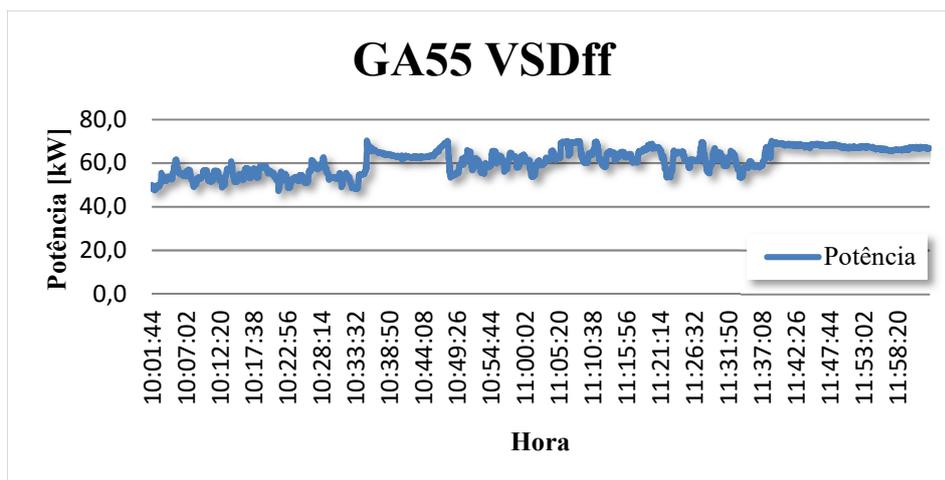


Figura 5: Funcionamento do compressor setor de esquadria.

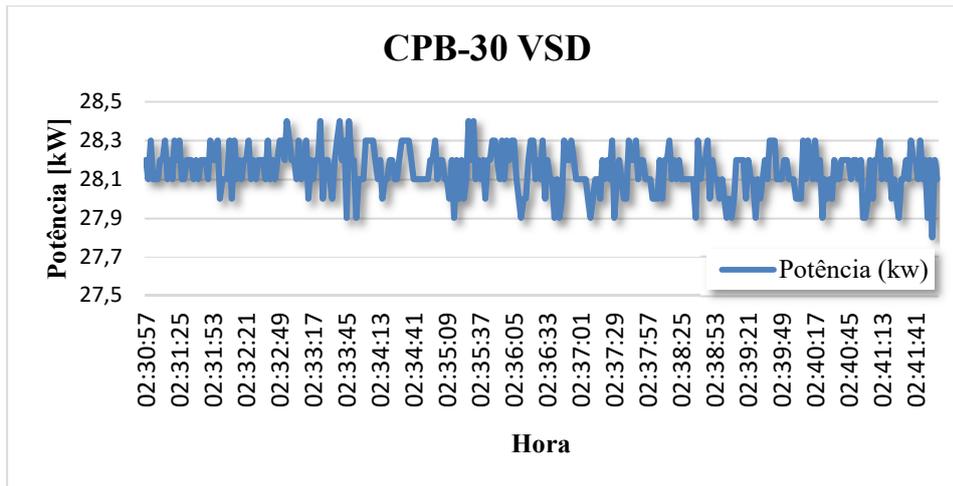


Figura 6: Funcionamento do compressor setor de esquadria.

Com o tratamento dos dados no *software Excel* pode-se visualizar o comportamento dos compressores em funcionamento. Os gráficos dos setores de plástico e extrusão, mostrados nas Figura 3 e 4, são típicos de sistemas de ar comprimido com compressores de carga e alívio superdimensionados. Desta forma pode-se perceber que o tempo que o compressor trabalha em carga é quase o mesmo de quando está em alívio.

O período de análise do compressor do setor de plástico para a geração do gráfico, Figura 3 foi de 184 horas, sendo que 104 horas foram trabalhadas em alívio, ou seja, 56,52 % de todo o tempo. No setor de extrusão foram 180 horas em análise com um total de 105 horas em alívio o que representa 58,33 % de todo o tempo trabalhando sem produzir ar comprimido, mas consumindo energia elétrica. Nos dois setores, o consumo médio dos compressores em alívio ficaram próximo dos 40 kW, no entanto a potência utilizada quando estão em carga ficaram entorno de 68 kW.

Pelo fato dos compressores do setor de esquadrias serem de velocidades variáveis os gráficos, Figura 5 e 6, tiveram um comportamento bastante diferente dos outros setores, isso ocorre porque os compressores ficam modulando a rotação conforme a demanda instantânea de ar comprimido, fazendo com que a potência do motor fique alterando com bastante frequência e sem entrar em alívio.

3.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA

Para a obtenção da potência média dos compressores foi utilizado o analisador de energia juntamente com a Equação (2), aplicando a teoria com a prática a fim de comparar os resultados obtidos nessa etapa do trabalho.



Tabela 3: Cálculo da potência média dos compressores.

Potência Média							
Compressor	P _L [kW]	P _{UL} [kW]	Total hora trabalhada	t _L [h]	t _{UL} [h]	P _A calculado [kW]	P _A analizador [kW]
GA55 C100P	68	39,5	184	80	104	51,89	53,51
GA55 P100	71,1	38,4	180	75	105	52,03	53,30
GA55 VSD _{ff}	-	-		-	-	-	62,67
CPB-30 VSD	-	-		-	-	-	27,93

A Tabela 3 mostra os resultados das potências médias adquiridas através dos cálculos e também com o analisador de energia. Para o compressor GA55 C100P do setor de plástico a potência média calculada foi de 51,89 kW ficando bem próximo ao fornecido pelo analisador de energia que foi de 53,51 kW, o que também aconteceu com o compressor GA55 P100, as duas potências ficaram bem próximas 52,03 kW para a calculada e, 53,30 kW do analisador.

A potência dos compressores do setor de esquadria são de 62,67 kW para o compressor GA55 VSD_{ff} e 27,93 kW para o CPB-30 VSD. Esses são os dados adquiridos pelo analisador de energia, entretanto como são compressores de velocidades variáveis não foi possível a aplicação da Equação (2) e, por esse motivo será utilizado as potências fornecidas pelo analisador para os cálculos futuros.

3.4 CUSTO ANUAL COM ENERGIA ELÉTRICA

Com a utilização das Equação (4), (5) e (6) é possível mensurar os valores gastos pela empresa com energia elétrica que são utilizadas pelos compressores na geração de ar comprimido.

Para a realização dos cálculos foi considerado que a empresa trabalhe 280 dias por ano, sendo que o setor de plástico trabalhe 24 horas por dia e os setores de extrusão e esquadrias, 18 horas por dia. O valor do kWh foi de R\$0,35, valor esse que seria a média entre os horários de ponta e fora de ponta, e também das taxas adicionais das bandeiras amarela e vermelha cobrados pela concessionária de energia, conforme Tabela 4.



Tabela 4: Custo anual com energia elétrica utilizada pelos compressores.

Custo anual					
Compressor	SEC [kWh/m ³]	H [h/ano]	EC [kWh/ano]	ER [R\$]	AEC [R\$/ano]
GA55 C100P	0,094	6.720	359.587,20	0,35	125.855,52
GA55 P100	0,087	5.040	268.632,00		94.021,20
GA55 VSD _{ff}	0,101	5.040	315.856,80		110.549,88
CPB-30 VSD	0,131	5.040	140.767,20		49.268,52
Total					379.695,12

Conforme mostrado na Tab. 4, o custo anual com energia elétrica gasto pela empresa foi de R\$ 379.695,12, desse valor R\$ 159.818,40 são as somas dos custos causados pelos compressores do setor de esquadrias, GA55 VSD_{ff} e o CPB-30 VSD e R\$ 125.855,52 representam o consumo do setor de plástico, compressor GA55 C100P, e o restante R\$ 94.021,20 pelo compressor GA55 P100 do setor de extrusão.

3.4 ANÁLISE DAS PERDAS CAUSADAS PELOS VAZAMENTOS

Nesta seção serão apresentadas todas as causas geradas pelos vazamentos, bem como o volume de ar comprimido desperdiçados pelos vazamentos, a potência utilizada para supri-los e os gastos anuais em cada setor, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Gasto anual causado pelos vazamentos.

Gasto anual causado pelos vazamentos							
Compressor	t _L [h]	t _{UL} [h]	LR [%]	Q _L [m ³ /h]	P _{los} [kW]	EL [kWh/ano]	CEL [R\$/ano]
GA55 C100P	3	6	33,33	189,60	17,83	119.862,40	41.951,84
GA55 P100	2	7	22,22	136,16	11,84	59.696,00	20.893,60
GA55 VSD _{ff}			38,86	324,00	35,21	177.458,40	62.110,44
CPB-30 VSD							
Total							124.955,88

Após a aplicação das Equação (7), (8), (9), (10) e (11) foi obtido os resultados mostrado na Figura 5. Com relação as taxas de vazamentos o setor com maior percentual de perdas foi o de esquadrias com 38,86 %, seguido pelo setor de plástico 33,33 % e pela extrusão 22,22 %. Esses percentuais representam um



volume em cada setor de 324,00 m³/h, 189,60 m³/h e 136,16 m³/h respectivamente. Para suprir esses volumes desperdiçados pelos vazamentos os compressores utilizaram uma potência média de 35,21 kW, 17,84 kW e 11,84 kW. Transformando isso para valores financeiros seria gasto em um ano o equivalente a R\$ 124.955,88, valor esse que poderia ser utilizado em investimentos para melhorar ainda mais a eficiência energética do sistema de ar comprimido.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos ao término dos cálculos desse trabalho pode se perceber o quão os sistemas de ar comprimido estão sendo ineficientes. Nessa seção serão tratados os problemas separadamente a fim de esclarecer melhor a situação de cada sistema.

A redução da fuga de ar é provavelmente a medida mais fácil e importante para obter economias de energia e tornar o sistema de ar comprimido mais eficiente. Conforme visto no decorrer deste trabalho a quantidade de vazamentos existentes estão deixando os sistemas ineficientes e causando elevados gastos com energia elétrica. No setor de plástico o volume total desperdiçado pelos vazamentos são de 189,60 m³/h e, em um ano isso representaria R\$ 41.951,84. A extrusão é o setor que menos possui perdas por vazamentos com 136,16 m³/h desperdiçados, conseqüentemente o menor gasto com energia elétrica, cerca de R\$ 20.893,60 por ano. Já o setor de esquadria é o que mais tem gastos com energia elétrica causada pelos vazamentos correspondente a R\$ 62.110,44 por ano, com um volume de 324,00 m³/h. A potência necessária para suprir esses vazamentos seria de aproximadamente 65 kW, ou seja, a empresa disponibiliza um compressor somente para os vazamentos.

Outro problema encontrado foi a quantidade de horas que os compressores de ar trabalham em alívio. No setor de plástico 56,52 % das horas trabalhadas do compressor são no modo em alívio, em um ano isso representaria 3.798 horas com o compressor trabalhando a uma potência média de 39,5 kW com um custo anual de R\$ 52.509,34. A potência média que o compressor do setor de extrusão utiliza quando está trabalhando em alívio é de 38,4 kW, o mesmo fica 58,33 % nesse modo, em alívio, o que representaria em um ano aproximadamente 2.939 horas trabalhadas, causando um gasto de R\$ 39.511,34, conforme será mostrado na



Tabela 6 e na Figura 7. No entanto o setor de esquadria não sofre com esse problema pelo fato dos compressores serem de velocidade variável.

Tabela 6: Custo anual do sistema de ar comprimido.

Custo anual do sistema de ar comprimido				
Setor	Vazamento (R\$)	Alívio (R\$)	Produção (R\$)	Total por setor (R\$)
Plástico	41.951,84	52.509,34	31.394,34	125.855,52
Extrusão	20.893,60	39.511,34	33.616,26	94.021,20
Esquadria	62.110,44	-	97.707,96	159.818,40
			Total	379.695,12

Analisando a Tabela 6 pode-se perceber que os valores gastos com energia elétrica, através dos vazamentos e das horas trabalhadas em alívio, são maiores do que os custos com energia elétrica utilizada para gerar ar comprimido para suprir a produção. O setor de plástico gasta três vezes mais com os problemas existente no sistema de ar comprimido do que com a quantidade de ar utilizado pela produção R\$ 31.394,34, em quanto que o setor de extrusão gasta R\$ 33.616,26 na geração de ar comprimido para a produção, enquanto que a ineficiência está gerando um gasto de R\$60.404,94. Os compressores VSD do setor de esquadria deixam o sistema mais eficiente que os outros, se comparado com o volume de ar comprido, isso porque os compressores deste setor são de velocidade variável eliminado os gastos com as horas trabalhadas em alívio.

4.1 MELHORIAS DO SISTEMA

Visando reduzir ao máximo o volume de ar comprimido desperdiçados pelos vazamentos, recomenda se a implantação de um plano de manutenção preventiva nos sistemas de ar comprimido juntamente com a aquisição de um detector de vazamento ultrassônico que permite identificar os vazamentos a uma distância de até 10 metros e até mesmo com o barulho da produção. O investimento para a compra do detector seria de aproximadamente R\$13.500,00.

Outro problema encontrado foi a quantidade de horas trabalhadas em alívio. Essas horas poderiam ser reduzidas através da interligação dos sistemas e da construção de uma central de ar comprimido. Essa ação permitiria que os compressores trabalhassem em um sistema de cascata, conforme Figura 8, evitando que um ou mais compressores trabalhem em alívio ao mesmo tempo.

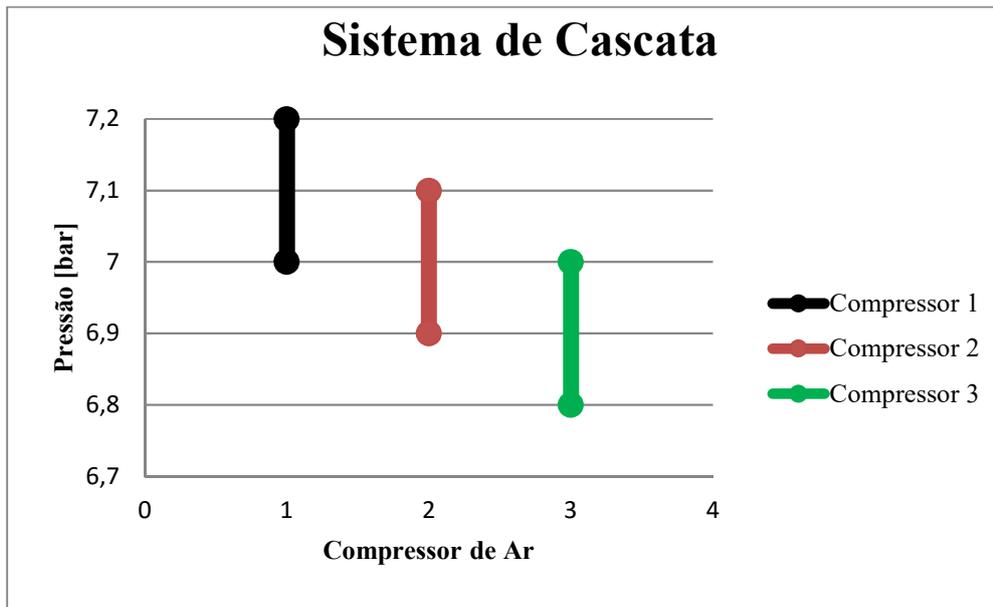


Figura 7: Sistema de controle tipo cascata em compressores de ar comprimido
Fonte: Adaptado de Natural Resources Canada (2007).

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A utilização do analisador de energia *Instrutherm mod. AE-200* foi importante para a elaboração deste trabalho, pois o mesmo coletou informações que serviram para comparar os resultados entre a teoria e a prática;
- Com a compilação dos dados para o *software Excel* pode se perceber os comportamentos dos compressores em especial os de carga e alívio, que demonstraram grande quantidade de horas trabalhadas no modo “alívio”;
- Pode se quantificar os custos anuais com energia elétrica utilizada pelos compressores, o volume de ar comprimido que são desperdiçados pelos vazamentos e quanto isso representa financeiramente;
- A utilização de compressores superdimensionados, vão acarretar em maior consumo de energia, elevado tempo de funcionamento em alívio e gastos financeiros desnecessários;
- Várias são as razões pelas quais valem a pena investir em tempo e esforço na redução dos custos com ar comprimido: menor consumo de energia, economia de



dinheiro, maior disponibilidade dos compressores e mais confiabilidade no sistema;

- Após os resultados obtidos ao termino dos cálculos deste trabalho, verificou se que os sistemas de ar comprimido estão sendo ineficientes, gerando elevados gastos com energia elétrica;
- Pode se perceber que os resultados adquiridos através dos cálculos utilizando a teoria, ficaram bem próximos aos resultados fornecidos pelo analisador de energia, transmitindo segurança para a aplicação da teoria em qual quer análise energética em sistemas de ar comprimido;
- Verificou-se que são inúmeras as possibilidades de melhorias nos processos industriais especialmente nos sistemas de ar comprimido;

REFERÊNCIA

COMPRESSED AIR CHALLENGE. **Improving Compressed Air System Performance**. U.S.A. Department of Energy: Washington, USA, 2003. 5-27 p.

DINDORF, R. **Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems**. 2012, XIIIth

METALPLAN AIR POWER. **MANUAL DE AR COMPRIMIDO**. 3. Ed. São Paulo, 2008. 41 p.

MARTINS, A. A., BISPO, D., BELINOVSKI, K. D., JÚNIOR, R. G. **Análise de Eficiência em Sistemas de ar Comprimido**. Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia, MG, 2010.

MOUSAVI, S., KARA, S., KORNFELD, B. **Energy Efficiency of Compressed Air Systems**. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Sydney, Australia, 2014,

NATURAL RESOURCES CANADA. **Energy Efficiency Reference Guide Compressed Air**. 2007.

RADGEN, P., BLAUSTEIN, E. **Compressed Air Systems in the European Union**. Energy, Emissions, Saving Potentials and Policy Actions, Stuttgart, Alemanha, 2001.

ROCHA, C. R., MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido**. Eletrobrás: Rio de Janeiro, 2005. 40-139 p.

S. A. AIR SOLUTIONS. **Boas Práticas em Ar Comprimido**. São Paulo, 2009.

SAIDUR, R., RAHIM, N. A., HASANUZZAMAN, M. A **Review on Compressed Air Energy and Energy Savings**. Kuala Lumpur, Malasia, 2010.



SESLIJA, D., IGNJATOVIC, I., DUDIC, S. **Increasing the Energy Efficiency in Compressed Air Systems**. 2012, 151-155 p.

TELLES, P. C. S. **Tubulações industriais**: materiais, projeto, montagem. 10. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

TOLMASQUIM, M. T., GUERREIRO, A., GORINI, R. Matriz Energética Brasileira. **Novos Estudos**, n. 79, nov. 2007.

VALADÃO, C. P. **Noções de compressores**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2014. 23-24 p.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela saúde e pela proteção nessa longa caminhada, a minha família em especial minha esposa e meus pais que sempre estiveram ao meu lado, a faculdade SATC juntamente com seus professores que procuraram passar todos seus conhecimentos em especial ao Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler e ao Me. Richard de Medeiros Castro, por último e, não menos importante a empresa IBRAP – Indústria Brasileira de Alumínio e Plástico a qual trabalho e que permitiu que eu pudesse realizar este estudo.