

ESTUDO DE CASO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA UTILIZAÇÃO DO AR COMPRIMIDO NO SETOR DE ENVASE DE DERIVADOS DO TRIGO EM INDÚSTRIA MOAGEIRA

Eudes Berfort, eudes-belfort131@hotmail.com¹

André Pimentel Moreira, apmoreira@ifce.edu.br¹

Doroteu Afonso Coelho Pequeno, doroteupequeno@terra.com.br¹

Evaldo Correia Mota, evaldom@ifce.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531

Resumo: O consumo de ar comprimido em um moinho de trigo é muito sazonal, os compressores de ar trabalham em regime ininterrupto de 24 horas, durante os sete dias semanais. Este trabalho se propõe realizar um estudo de caso sobre os principais consumidores de ar comprimido nos envases em uma empresa de derivados do trigo. Devido à facilidade de medição e por expressarem resultados calculados reais, devido a constante operação, foi calculado o consumo de ar comprimido dos equipamentos e máquinas dos envases e posteriormente comparada com a situação atual. Diante dos resultados obtidos, foi apresentada uma situação proposta buscando a otimização desse consumo e eficiência energética para a produção do ar comprimido da planta industrial, os resultados apresentam, ainda a economia de energia elétrica com as mudanças sugeridas neste trabalho.

Palavras-chave: Consumo de ar comprimido, indústria de moagem, eficiência energética, compressores de ar

1. INTRODUÇÃO

O processo de moagem de trigo por ser de grau alimentício, possui uma rica diversidade de sistemas pneumáticos, que acarreta alto consumo energético para a produção do ar comprimido. Segundo Viana *et al.* (2012), o ar comprimido é uma forma de transporte de energia de enorme utilidade e com inúmeras aplicações. Em muitos campos chega a competir com a eletricidade e, em alguns casos particulares, somente ele pode ser usado. Por exemplo, no interior das minas, onde podem existir gases explosivos, ou em trabalhos subaquáticos, onde há o risco de descargas elétricas.

Para uma empresa de moagem de trigo, o ar comprimido é aplicado em máquinas operatrizes, vibradores pneumáticos, gavetas pneumáticas, ferramentas pneumáticas, transporte de produtos e sistemas de automação.

De acordo com Eletrobrás (2005), deve-se sempre aperfeiçoar o consumo da energia, pois se obtém a redução dos custos, uma vez que, na maioria das vezes, os preços da energia elétrica são fixados por concessionárias de energia. Segundo Saidur *et al.* (2009), melhorias nos sistemas de ar comprimido podem alcançar 20-50% de economia de energia. Na Fig. 1 são observados os custos dos modos de entrega de energia.

Em, Saidur *et al.* (2009), dois dos fatores mais importantes que influenciam o custo de o ar comprimido é o tipo de controle do compressor e o dimensionamento do compressor.

Segundo Atlas Copco (2017) os compressores tradicionais que trabalham com um controle de carga/alívio funcionam entre dois pontos de pressão programados. Quando é atingida a pressão máxima, o compressor passa para a condição de alívio. Durante a produção de ar comprimido com médios e baixos valores de vazão, o consumo de energia em alívio pode ser excessivo, desperdiçando grandes quantidades de energia.

Ainda em, Saidur *et al.* (2009), embora as mudanças tecnológicas melhorem a eficiência do ar comprimido, a mudança institucional e o comportamental, que envolvem facilitadores governamentais e de interesse público, produzem maiores efeitos.

Assim, este artigo propõe um estudo de caso para redução do consumo energético na geração do ar comprimido em uma empresa de moagem de trigo, para tal, será calculada com base na literatura existente a porcentagem de perdas e custos com vazamento, identificando os possíveis pontos de redução de consumo de ar comprimido, seja por substituições de atuadores como por redução da pressão de trabalho. Ainda neste trabalho são verificados se os compressores e reservatórios estão adequados à capacidade de produção da planta industrial.

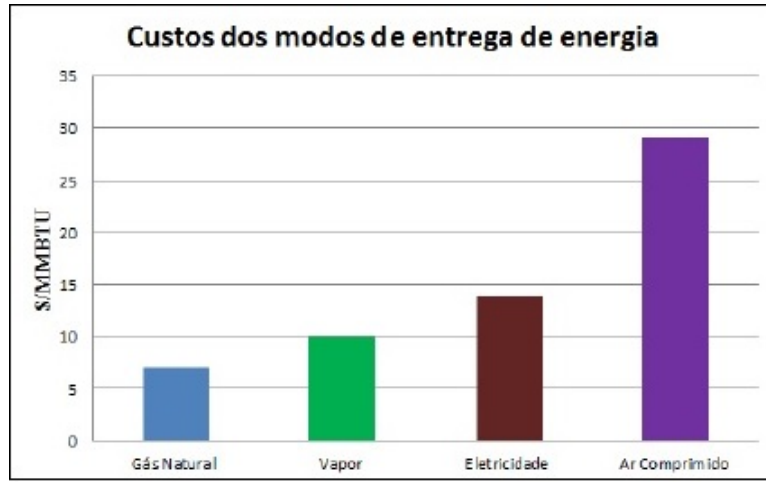


Figura 1: Representação gráfica dos modos de entrega de energia. Adaptado de Saidur *et al.* (2009)

1.1 Referencial Teórico

De acordo com Santos (2014) e Fialho (2003), o consumo de ar em cilindros de duplo efeito (C_{de}) podem ser estimados conforme a Eq. 1.

$$C_{de} = \frac{(A + a) \cdot L \cdot \left(\frac{P_t + P_{atm}}{P_{atm}} \right)}{t \cdot 1000} \quad (1)$$

Em que,

- C_{de} = Consumo do cilindro pneumático de dupla ação [l/s];
- A - Área do pistão do cilindro pneumático [cm^2];
- a - Área da coroa circular do cilindro pneumático [cm^2];
- P_t - Pressão de trabalho [kgf/cm^2];
- P_{atm} - Pressão atmosférica [kgf/cm^2];
- t - Tempo de ciclo do cilindro pneumático [s].

De acordo com Chicago Pneumatic (2011), o consumo energético dos compressores (C_E) podem ser determinados através da Eq. 2.

$$C_E = \frac{(K \cdot Pot_{carga}) + (Z \cdot Pot_{alivio}) \cdot t \cdot C \cdot F_s}{\eta} \quad (2)$$

Em que,

- K - Fração de hora em porcentagem em carga;
- Z - Fração de hora em porcentagem em alivio;
- Pot_{carga} - Potência do motor elétrico do compressor em carga [kW];
- Pot_{alivio} - Potência do motor elétrico do compressor em alivio [kW];
- t - Tempo de funcionamento [h];
- F_s - Fator de serviço do motor;
- η - Rendimento do motor.
- C - Custo da energia (concessionária) [kWh];

De acordo com Fialho (2003), é possível dimensionar o diâmetro do pistão e diâmetro da haste de um atuador através da Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente:

$$D_p = \sqrt[2]{\frac{F_a}{\pi \cdot P_t}} \quad (3)$$

- D_p - Diâmetro do pistão [cm^2];
- F_a - Força teórica de avanço [kgf];
- P_t - Pressão de trabalho [kgf/cm^2];

$$d_h = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot F_a \cdot S \cdot \lambda^2}{\pi^3 \cdot E}} \quad (4)$$

- d_h - Diâmetro da haste do cilindro pneumático [cm^2];
- F_a - Força teórica de avanço [N];
- S - Fator de segurança da haste [3,5 a 5,0];
- λ - Comprimento livre de flambagem [cm];
- E - Módulo de elasticidade do aço [N/cm^2].

De acordo com Eletrobrás (2005), pode-se estimar a porcentagem de vazamento de ar comprimido através da Eq. 5.

$$Q_{vaz} = \frac{Q_{comp} \cdot t_c}{t_t} \quad (5)$$

- Q_{vaz} - Vazão atribuída aos vazamentos [m^3/min];
- Q_{comp} - Capacidade nominal de produção do compressor usado no teste [m^3/min];
- t_t - Tempo total (alívio + compressão) registrado no primeiro cronômetro [min];
- t_c - Tempo do compressor em carga (compressão) registrado pelo segundo cronômetro [min];

De acordo com Prudente (2013) um reservatório deve ter pelo menos a capacidade de armazenamento da produção de ar comprimido total fornecida pelo compressor no primeiro minuto. Para Fargon (2017), o volume do reservatório (m^3 ou l) deve ter a capacidade de 10% a 20% da geração total de ar comprimido em m^3/min ou l/min .

2. Materiais e Métodos

A pesquisa foi realizada em uma indústria de moagem de trigo em Fortaleza-CE. A planta industrial possui quatro compressores e um secador por refrigeração do fabricante Atlas Copco. No estudo foram analisadas as situações cotidianas, onde são ligados três compressores e o outro permanece em *stand by*, sendo requisitado em caso de impossibilidade operacional de um dos outros três. Assim, foram realizadas análises sobre o custo energético nas três situações usuais de operação e uma proposta após a análise dos dados de operação.

Embora as pressões de trabalho das máquinas sejam ajustadas pelos fabricantes, foram utilizadas pressões empíricas, a fim de verificar a possibilidade de redução da pressão sem interferir no processo. Dessa forma, pode-se obter maior eficiência energética.

Foram identificados os principais pontos de consumo de ar comprimido dentro da planta industrial, definidos para o moinho como os setores de ensacamento ou envases. Estes correspondentes aos setores de ensacamento doméstico, ensacamento industrial, ensacamento de subprodutos, *big bag* e *food service*.

Para estimar o consumo de ar comprimido dos cilindros utilizados nas máquinas da planta industrial, foram identificadas nas especificações dos atuadores os fatores de carga, diâmetro do pistão e da haste e os deslocamentos dos cilindros. Além dos dados coletados, foram calculados, através das equações sugeridas na literatura, os tempos de ciclo de cada cilindro. A fim de validar os resultados obtidos, foram consultados os departamentos de engenharia aplicada dos fornecedores das máquinas.

Foram ainda analisados os custos energéticos na ponta e fora de ponta, tendo como valores bases os fornecidos pelo departamento de manutenção. Uma vez que a planta contrata energia pelo mercado livre, pagando a distribuidora de energia, apenas as tarifa de uso de serviço de distribuição (TUSD).

Na Tabela 1 são apresentadas as especificações dos compressores utilizados na planta industrial.

Tabela 1: Descrição dos compressores da planta.

Compressores	Potência (cv)	Rotação (RPM)	DLE (m^3/h)	Controlador
GA75 VSD APD	100	2145	614,2	Elektronikon II
GA55AP100 NEW	75	3570	625,28	Elektronikon Graphic
GA55 AP 100	75	3582	612,72	Elektronikon
GA45-150FF	60	3545	400	Elektronikon II

O compressor de velocidade variável (VSD) controla a velocidade do motor da unidade compressora, por inversor de frequência, de acordo com a demanda de ar, mantendo a pressão de *setpoint* constante. Todos os compressores da planta possuem um controlador/PLC, Eletronikon, com o qual é possível programar tarefas semanais com diferentes parâmetros estabelecidos, definir duas bandas de pressão para períodos de alto e baixo consumo, além de monitoramento de parâmetros essenciais com tempo de funcionamento, temperatura do óleo da unidade compressora entre outros.

3. Resultados e Discussões

Na planta industrial, objeto do estudo de caso, ocorrem situações em que três compressores são acionados simultaneamente para atender a demanda de ar comprimido. Assim, na Tabela 2 são apresentados os fluxos volumétricos efetivos das situações de operação, as quais representam o somatório das vazões dos compressores em operação durante as situações cotidianas praticadas na empresa de moagem.

Tabela 2: Fluxo volumétrico efetivo das situações cotidianas de operação.

Situação	Compressores acionados	DLE (m^3/h)
1	GA75 VSD APD + GA55AP100 + GA45-150FF	1.626,90
2	GA75 VSD APD + GA55AP100 NEW + GA45-150FF	1.639,50
3	GA75 VSD APD + GA55AP100 + GA55AP100 NEW	1.852,20

A situação 3 apresentou uma maior vazão por ser constituída pelos três maiores compressores da planta industrial, as situações 1 e 2 apresentam leves diferenças nas vazões, uma vez que o compressor GA55AP100NEW possuem uma vazão maior que o GA55AP100.

A Figura 2 apresenta o custo energético para cada compressor e para as situações cotidianas de operação. As correntes usadas para o cálculo do custo energético das situações foram as correntes medidas, o que explica as variações de valores se somados os custos individuais de cada compressor. Um aumento percentual do custo energético entre os horários dentro e fora de ponta para cada compressor pode ser observado, e estimado em torno de 178%, o que demonstra a importância de buscar um menor custo energético principalmente na ponta.

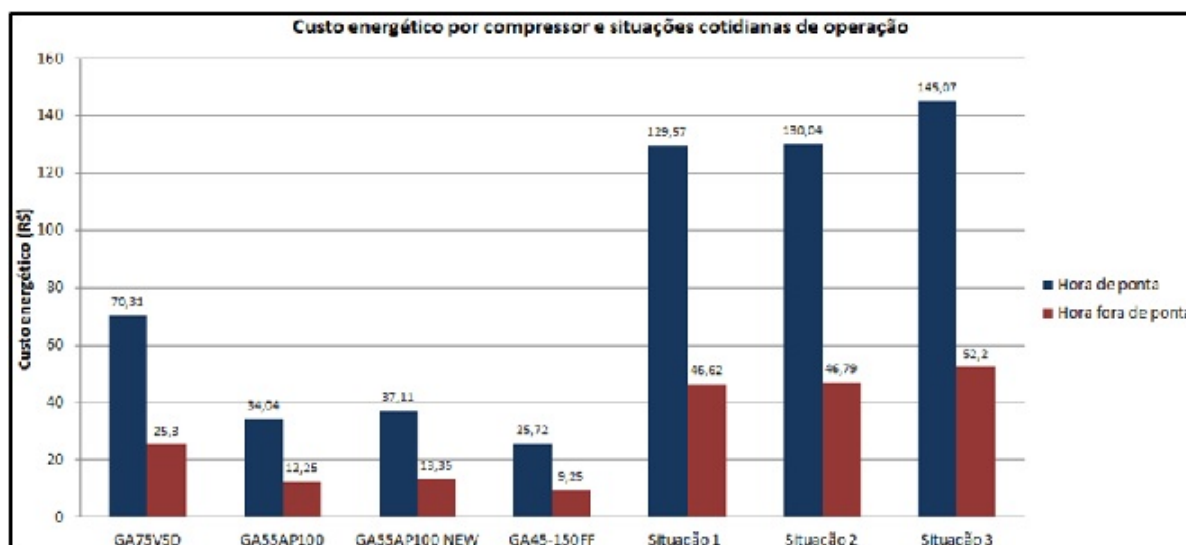


Figura 2: Custo energético por compressor e situações cotidianas de operação.

Na Tabela 3, é apresentado o custo energético das três situações mais usadas. Foi observado em todas as situações que os compressores não estavam entrando em alívio. Pode-se afirmar que para o atual quadro de operação dos compressores, a situação 1 apresenta-se mais econômica e a situação 3 a de maior custo. Isto se dá devido a situação 3 ser composta pelos compressores de maior potência de acionamento.

Tabela 3: Custo energético dia e ano das três situações mais usadas.

Situação	Custo (R\$/dia)	Custo (R\$/ano)
1	1.367,84	499.261,60
2	1.372,77	501.061,05
3	1.531,42	558.967,71

O ensacamento doméstico é responsável por embalar as farinhas Tipo 1 e com Fermento em saquinhos de 1 kg e posteriormente em fardos de 10 kg. Inicialmente foi estimado o consumo ar comprimido da máquina em condições

normais de operação, em seguida em condições mais críticas de operação com menor tempo de ciclo dos atuadores, foi estimado o consumo máximo da máquina, o qual pode ser comparado com o fornecido pelo fabricante. Na Tabela 4 é apresentado o consumo de ar da máquina Fawema.

Tabela 4: Consumo de ar da Fawema.

Consumo	Consumo de ar (m^3/h)
Estimado	30,60
Estimado máximo	54,60
Fabricante máximo	60,00

Uma das maneiras de diminuir o consumo de ar comprimido e consequentemente o custo energético para sua produção é a diminuição das pressões de trabalho, sem redução de produtividade. A Figura 3 apresenta o custo energético para uma máquina Fawema utilizando as pressões de trabalho de 6,2 e 5,8 bar. A economia anual após redução da pressão é estimada em R\$ 1.324,95.

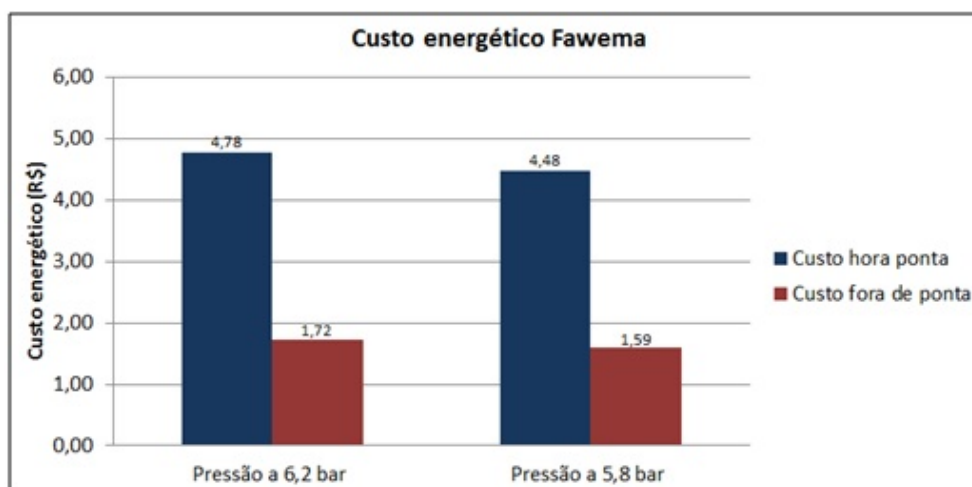


Figura 3: **Custo energético para uma máquina Fawema.**

Na Tabela 5 é apresentada ainda a economia energética em ar comprimido parando máquinas na ponta e pode ser justificada uma vez que a demanda máxima de fardos solicitados pela logística é de 12.000 fardos. Considerando que uma máquina faz 660 fardos/hora, em 9 h 05 min a produção é atingida e ainda que o turno de trabalho se inicie às 6 h, a produção deve ser finalizada às 16 h, com o adicional de uma hora para almoço, viabilizando as paradas nos horários de ponta (17h30min às 20h30min).

Tabela 5: Economia energética em ar comprimido parando máquinas na ponta.

Quantidade	Custo na ponta (R\$/h)	Economia (R\$/dia)	Economia (R\$/ano)
1 Fawema	4,78	9,18	3.350,70
2 Fawemas	9,56	18,36	6.701,40

O ensacamento industrial é constituído por três máquinas carrosséis, são ensacadeiras de farinha formadas por seis bocas, que giram constantemente para enchimento dos sacos. A Tabela 6 apresenta o consumo de ar comprimido estimado para as três carrosséis. As carrosséis 1 e 2, ensacam em sacos de 25 e 50 kg, enquanto que na carrossel 3 apenas sacos de 50 kg.

Tabela 6: Consumo de ar das carrosséis em (m^3/h).

Consumo	Sacos de 50 kg	Sacos de 25 kg
Estimado Carrossel 1	9,82	10,04
Estimado Carrossel 2	8,98	9,20
Estimado Carrossel 3	49,11	0

É possível observar nas máquinas carrosséis 1 e 2, a existência de um aumento no consumo de ar comprimido, uma vez que a produtividade das máquinas são aumentadas, quando processados sacos de 50 kg com a produção de 10 sacos/minuto e sacos de 25 kg com a produção é de 12 sacos/minuto. A máquina carrossel 3 apresenta o maior consumo por possuir a maior quantidade de atuadores pneumáticos, nesta são envasados apenas sacos de 50 kg.

A Figura 4 apresenta o custo energético das máquinas carrosséis. Foi estimado o custo energético com a redução de pressão de 6,5 bar para 6,0 bar, a economia anual para as carrosséis é estimada em R\$ 284,70, R\$ 197,10, R\$ 1.237,35 para as carrosséis 1, 2 e 3 respectivamente.

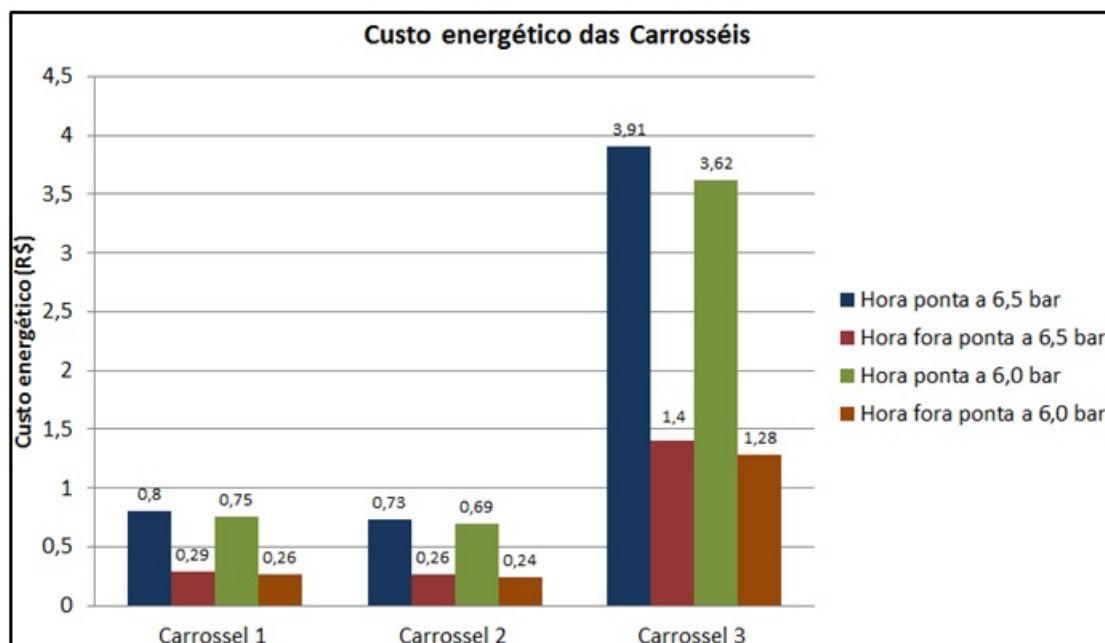


Figura 4: Custo energético das máquinas carrosséis.

Na Tabela 7 são apresentados os cilindros dos bate saco no ensacamento industrial. Foi verificado diferentes atuadores desempenhando a mesma atividade além de um sobre dimensionamento dos cilindros, já que a força máxima necessária seria de 50 kgf. O mesmo pôde ser verificado para o ensacamento de subproduto como é apresentado na Tab 8.

Tabela 7: Cilindros dos bate saco no ensacamento industrial.

Cilindro	Aplicação	Ciclo (s)	Consumo de ar (l/h)	Força de avanço (kgf)
Ø50x330 mm	Bate saco 1	4,76	6.687	96
Ø50x300 mm	Bate saco 2 e 3	4,95	5.846	96

Tabela 8: Cilindros dos bate saco no ensacamento de subproduto.

Cilindro	Aplicação	Ciclo (s)	Consumo de ar (l/h)	Força de avanço (kgf)
Ø50x300 mm	Bate saco 1	5,6	4.828	96
Ø50x300 mm	Bate saco 2	7,5	2.391	96

De acordo com a Equação 3 foi possível determinar o cilindro mais adequado para os bate sacos dos ensacamentos de subprodutos e industrial. Foram utilizadas as forças de projeto de 40 kgf e de 50 kgf, que correspondem à força máxima necessária para o subproduto e para o industrial, respectivamente. Para compensar os atritos internos, perdas de pressão e desgaste de componentes foram utilizados os coeficientes de correção de força dos cilindros pneumáticos igual a 1,35. Na Tabela 9 são apresentados os cilindros sugeridos comercialmente para os bate saco do subproduto e industrial. Com a modificação, foi estimada a redução no consumo de ar comprimido em 57,6% e 60,2% para os bate sacos dos subprodutos e do industrial, respectivamente.

Tabela 9: Cilindro sugerido para os bate saco do subproduto e industrial.

Cilindro	Aplicação	Ciclo (s)	Consumo de ar (l/h)	Força de avanço (kgf)
Ø40x200 mm	Industrial	4,95	2.494,36	76,86
Ø40x200 mm	Subproduto	7,5	1.530,59	76,86

O ensacamento de subprodutos, são eles: farelo e remoído, é constituído por duas máquinas, com a produção de 500 sacos/hora em cada máquina. A Tabela 10 apresenta o consumo de ar do ensacamento de subprodutos. O consumo de ar comprimido foi maior na máquina 1, uma vez que o bate saco da mesma consome mais ar.

Tabela 10: Consumo de ar do ensacamento de subprodutos

	Consumo de ar comprimido [m^3/min]
Consumo estimado máquina 1	63,22
Consumo estimado máximo máquina 1	78,00
Consumo estimado máquina 2	60,78
Consumo estimado máximo máquina 2	75,00

A Figura 5 apresenta o custo energético do ensacamento de subprodutos. A economia anual reduzindo a pressão de operação de 6,0 para 5,5 bar é de R\$ 2.179,05 para a máquina 1 e de R\$ 1.949,10 para a máquina 2.

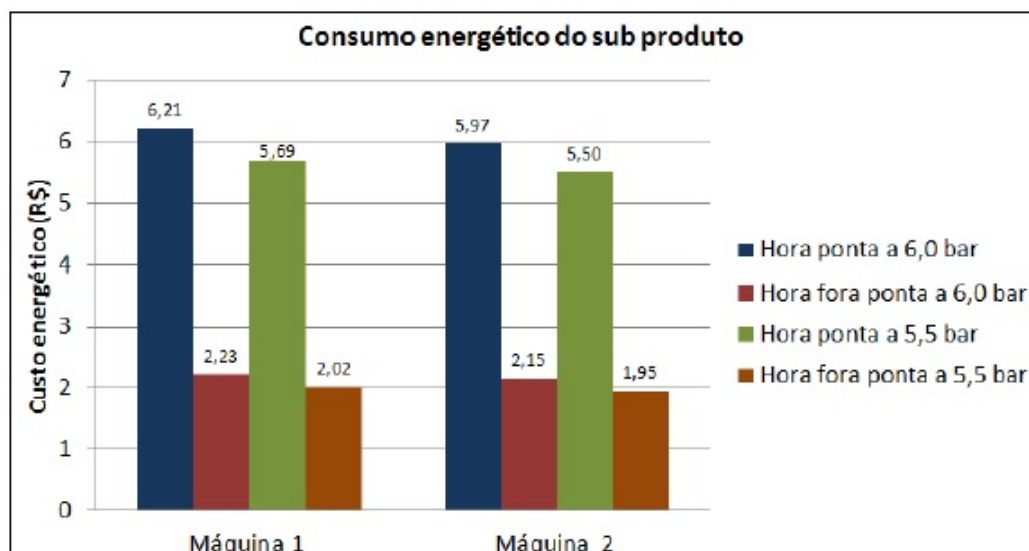


Figura 5: Custo energético do ensacamento de subproduto.

Ainda para o ensacamento de subprodutos, existe a possibilidade de parar máquinas no horário de ponta, uma vez que a capacidade de envase dos subprodutos é maior que a capacidade máxima de produção, que é de 210 sacos/hora para o farelo e 45 sacos/hora para o remoído, considerando os três moinhos em operação. Na Tabela 11 é apresentada a economia energética em ar comprimido parando máquinas do subproduto na ponta.

Tabela 11: Economia energética em ar comprimido parando máquina na ponta - subprodutos

	Custo na ponta (R\$/h)	Economia (R\$/dia)	Economia (R\$/ano)
Máquina 1	6,21	18,63	4.358,10
Máquina 2	5,97	17,91	4.182,90

O *big bag* trata-se de um ensacadeira de farinha, monocanal para sacos de 1.080 kg. Para esse setor foi estimado um consumo de ar de apenas $1,9 m^3/h$, com custos de R\$ 0,15 e R\$ 0,05, para os horários de ponta e fora de ponta respectivamente. Diante de custos tão baixos, não é aconselhável parar a produção desse ensacamento, nem mesmo em horário de ponta. O *food service* é constituído por uma ensacadeira Bosch e uma enfardadeira Raumak. Inicialmente a farinha é envasada em sacos plásticos de 5 kg e depois em fardos de 25 kg. O consumo de ar comprimido por máquina para o *food service*, é de $66,60 m^3/h$ para a Raumak e de $1,73 m^3/h$ para a Bosch. Foi possível notar que o consumo da Bosch é inferior a Raumak, isso se deve pelo fato da Raumak possuir um maior número de atuadores e usar mais ar para refrigerar a solda do fardo. É possível verificar ainda, que o maior percentual de consumo nas duas máquinas é na refrigeração da solda sendo de 79% para a Raumak e de 81% para a Bosch. O custo energético do ar comprimido das máquinas do *food service* foram estimados no horário de ponta em R\$ 5,30 e R\$ 0,14 para a Raumak e a Bosch, respectivamente. No horário fora de ponta foram estimados em R\$ 1,91 para a Raumak e R\$ 0,05 para a Bosch. O *food service* é outro setor com possibilidade de parar na ponta devido à demanda de produção. Na Tabela 12, é apresentada a economia energética em ar comprimido parando máquina do *food service* na ponta.

Tabela 12: Economia energética em ar comprimido parando máquina na ponta - *food service*

	Custo na ponta (R\$/h)	Economia (R\$/dia)	Economia (R\$/ano)
<i>Food Service</i>	5,44	10,44	3.810,60

A Figura 6 apresenta o consumo de ar comprimido estimado por setor do moinho. É possível observar também as

diminuições de consumo estimadas com as reduções de pressões nos setores. Para o *food service* e *big bag*, não foram sugeridas reduções de pressão, uma vez que o *food service* utiliza muito ar comprimido para refrigerar as soldas nos sacos plásticos e possíveis diminuições poderiam causar problemas no selamento dos sacos, comprometendo a integridade da embalagem. Já no *big bag* não foi sugerido redução da pressão pois o consumo é muito baixo, podendo ser considerado irrelevante.

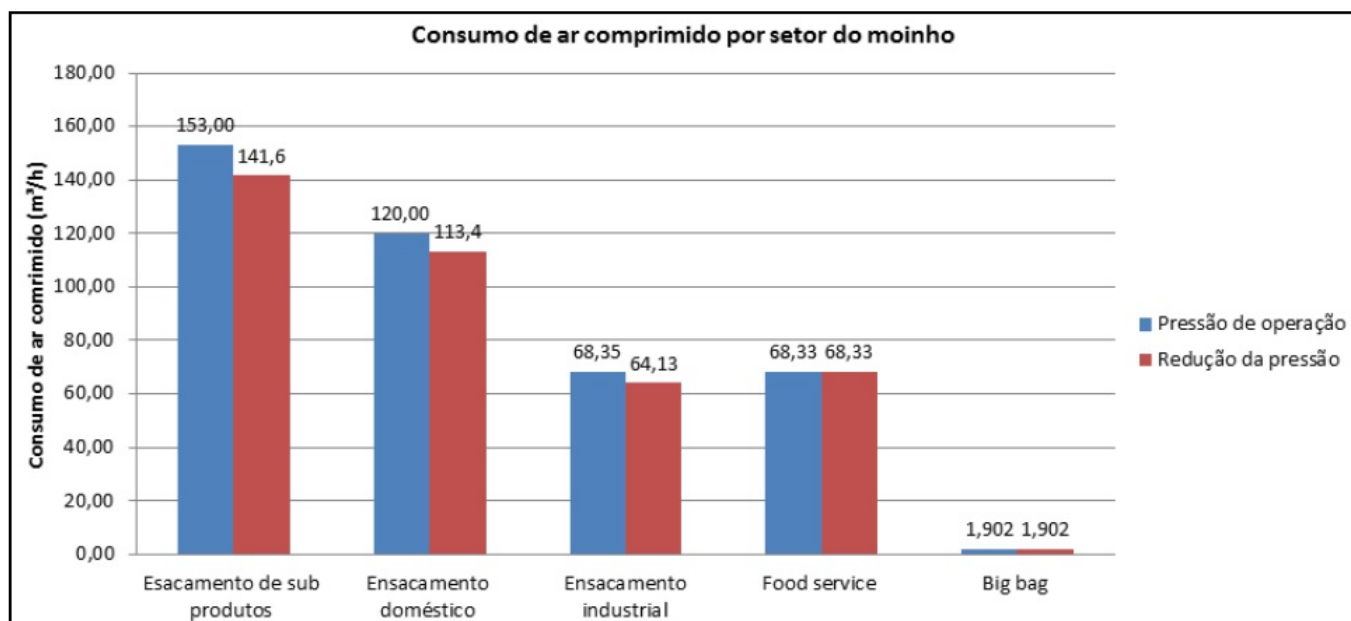


Figura 6: Consumo de ar comprimido estimado por setor do moinho.

Diante do quadro energético de consumo de ar comprimido da fábrica foi proposta a ligação dos seguintes compressores: GA55AP100 + GA55AP100 NEW + GA45-150FF. Os custos propostos são estimados em R\$ 89,20 e R\$ 32,09, para os horários de ponta e fora de ponta, respectivamente. Na Tabela 13 é apresentada a redução energética da situação proposta. O maior percentual de redução econômica anual ocorre quando comparado a situação proposta com a situação cotidiana 3, o que sugere afirmar que o GA75VSD não está modulando o consumo com relação a demanda de ar, possivelmente devido a vazamentos de ar comprimido na planta industrial. Ainda podemos afirmar que a situação 3 é a de maior custo pois conta com os maiores acionamentos e que a economia anual média sobre as situações cotidianas seria de R\$ 176.119,60.

Tabela 13: Redução energética da situação proposta

	Custo energético (R\$/dia)	Custo energético (R\$/ano)	Economia (R\$/ano)	Redução (%)
Proposta 1	941,49	343.643,85	-	-
Situação 1	1.367,84	499.261,60	155.617,75	31,17
Situação 2	1.372,77	501.061,05	157.417,20	31,41
Situação 3	1.531,42	558.967,71	215.323,86	38,52

Utilizando a Equação 5, foi realizado o teste de vazamentos para medir as perdas com vazamentos de ar comprimido. Com a fábrica parada, foram desligados todos os compressores com exceção o GA45-150FF, que produz vazão de 400 m^3/h . No entanto, a vazão do compressor não conseguiu atender a demanda de vazamentos, considerando que o mesmo não entrou em alívio. Dessa forma, foi desligado o GA45-150FF e acionado o GA55AP100, o segundo compressor com menor vazão, com vazão de 612,72 m^3/h .

A Tabela 14 contém os resultados do teste de vazamento de ar comprimido, onde foi possível observar um baixo tempo de alívio do compressor durante o teste, indicando a presença de uma grande quantidade de vazamentos.

Tabela 14: Teste de vazamento de ar comprimido

	Tempo compressão + alívio	Tempo compressão	Tempo de alívio
Medição 1	1min 18s	1min 2s	16s
Medição 2	1min 18s	1min 2s	16s
Medição 3	1min 16s	1min 1s	15s
Medição 4	1min 16s	1min 1s	15s
Medição 5	1min 19s	1min 4s	15s

Adotando os tempos médios e utilizando a Equação 5, foi estimado o Q_{vaz} em $490 \text{ m}^3/\text{h}$ e o custo anual de vazamentos para as três situações cotidianas.

O custo é maior para a situação 3, pois embora tendo a maior vazão o que diminui a porcentagem de perdas com vazamentos, é a que possui maiores custos na ponta e fora de ponta. A Tabela 15 contém o custo energético dos vazamentos nas três situações analisadas.

Tabela 15: **Custo energético dos vazamentos**

	Vazão (m^3/h)	%Perdas	Custo ponta (R\$/h)	Custo fora ponta (R\$/h)	Custo (R\$/dia)	Custo (R\$/ano)
Situação 1	1639,50	23,04	29,85	10,74	315,09	115.007,85
Situação 2	1626,90	23,17	30,13	10,84	318,03	116.080,95
Situação 3	1852,20	20,94	30,37	10,93	320,64	117.033,60

Para Meneghel, Cavaler e Castro (2017), Os vazamentos por sua vez, podem representar uma perda de até 30% da geração total em um sistema de ar comprimido e para Eletrobrás (2005), instalações com idade superior a 15 anos e em estado precário, superior a 20% para vazamentos. A instalação em estudo possui 25 anos. Assim, serão adotados 25% da demanda da fábrica para vazamentos. É possível então estimar o consumo total da fábrica, em $1.471,95 \text{ m}^3/\text{h}$. Assim, o fluxo volumétrico fornecido por três compressores em operação, que é em média $1706 \text{ m}^3/\text{h}$, considerando as situações cotidianas, se apresenta como suficiente para o abastecimento do ar comprimido na fábrica, os compressores estão bem dimensionados. No entanto, os vazamentos estão proporcionando aos compressores um regime de trabalho, na maior parte do ciclo de operação, em plena carga.

A Tabela 16 apresenta a economia estimada nas situações propostas com a combinação dos compressores, na eliminação de vazamentos, parada de máquinas na ponta, redução das pressões de trabalho e redimensionamento dos principais atuadores.

Tabela 16: **Economia estimada com as situações propostas**

	Vazão (m^3/h)
Combinação dos compressores	176.119,60
Eliminação de vazamentos	116.040,80
Parada de máquinas na ponta	19.053,00
Redução das pressões de trabalho	7.172,25
Redimensionamento dos atuadores	2.462,18
Total	320.847,83

4. Conclusão

Inicialmente imaginava-se que o principal consumidor de ar da planta industrial era o *food-service*, devido aos grandes gastos em ar comprimido para a refrigeração das soldas dos sacos de polietileno. Contudo, através dos resultados obtidos, observa-se que o maior consumidor é o ensacamento de sub produtos com $153 \text{ m}^3/\text{h}$.

Um aumento percentual do custo energético entre os horários dentro e fora de ponta para cada compressor pode ser observado, e estimado em torno de 178%, o que demonstra a importância de buscar um menor custo energético principalmente na ponta.

Verificou-se ainda, através dos testes com a operação dos compressores, que o desperdício de ar comprimido apresentado está alto. Devido a isso, os compressores não permanecem em alívio durante o regime normal da planta industrial. O comportamento operacional apresentado pelos compressores indicam que é necessário investir na eliminação e prevenção de vazamentos, inclusive com a adoção de sistemas de ultra-som.

O excesso de vazamento acarreta, além da redução da vida útil dos compressores, redução dos intervalos de manutenção e economia anual de R\$ 116.040,80. O fluxo volumétrico fornecido por três compressores em operação, que é em média $1.706 \text{ m}^3/\text{h}$, considerando as situações cotidianas, se apresenta como suficiente para o abastecimento do ar comprimido na fábrica, os compressores estão bem dimensionados. No entanto, os vazamentos estão proporcionando aos compressores um regime de trabalho, na maior parte do ciclo de operação, em plena carga.

Somado a economia energética proporcionada pela eliminação de vazamentos, é possível ainda obter um melhor índice de economia de ar comprimido, uma vez que, foi identificada a melhor combinação de acionamento dos compressores para atender a demanda da fábrica, parada de máquinas no horário de ponta sem interferir na produção, adequações das pressões de trabalho e redimensionamento dos atuadores nos maiores consumidores.

Tais intervenções indicam, através de uma análise simples, uma redução anual de R\$ 320.847,83, do que representa 13,96% sobre as tarifas anuais de uso de serviço de distribuição (TUSD).

Embora os valores dos resultados apresentados neste trabalho tenham sido determinados através de ensaios com a coleta e análise de dados e outros através das equações sugeridas pela literatura, apresentaram erro médio de 15%. Assim, aconselha-se aprofundar o estudo a fim obter a validação dos custos estimados.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a indústria de moagem em especial ao coordenador de manutenção Marcos Aurélio Dias de Carvalho, que contribuiu com as sugestões e comentários relevantes durante o desenvolvimento deste trabalho. .

6. REFERÊNCIAS

- Atlas Copco, 2017. “Compressores de parafuso rotativo lubrificado: GA 15-30/GA 18-30 VSD”. São Paulo, Brasil, p. 16. Disponível em: <<http://equipoar.com.br/images/catalogos/20140624042609-catalogo.pdf>>. Acesso em: 09 out 2017.
- Eletrobrás, 2005. *Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil. 208 p.
- Fargon, 2017. “Reservatório para ar comprimido”. <<http://fargon.com.br/catalogos/reservatorio.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- Fialho, A.B., 2003. *Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos*. Ed. Érica, São Paulo, Brasil. 324 p.
- Prudente, F., 2013. *Automação Industrial Pneumática: Teoria e Aplicações*. LTC, Rio de Janeiro, Brasil. ISBN 978-85-216-2119-5. 264 p.
- Saidur, R., Rahim, A. e Hasanuzzaman, M., 2009. “A review on compressed-air energy use and energy savings”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 4, pp. 1–18.
- Santos, Adriano Almeida ; Silva, A.F.d., 2014. *Automação Pneumática : Produção, tratamento e distribuição de ar comprimido, dimensionamento de redes, cilindros e geração de vácuo, comando de circuitos combinatórios e sequenciais*. Ed. Publindustria, São Paulo, Brasil. ISBN 978-989-723-072-1. 340 p.
- Viana, A.N.C., da Costa Bortoni, E., Nogueira, F.J.H., Haddad, J., Nogueira, L.A.H., Venturini, O.J. e Yamachita, R.A., 2012. *Eficiência energética: fundamentos e aplicações*. Agência Nacional de Energia Elétrica, Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai, Campinas, São Paulo. 1 ed. 315p.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CASE STUDY OF ENERGY EFFICIENCY IN THE USE OF COMPRESSED AIR IN THE CONTAINER SECTOR OF PACKAGING OF WHEAT DERIVATIVES IN THE MILLING INDUSTRY

Eudes Berfort, eudes-belfort131@hotmail.com¹

André Pimentel Moreira, apmoreira@ifce.edu.br¹

Doroteu Afonso Coelho Pequeno, doroteupequeno@terra.com.br¹

Evaldo Correia Mota, evaldom@ifce.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531

Resumo: *The consumption of compressed air in a wheat milling industry is very seasonal, the air compressors work on uninterrupted 24-hour, during the seven days a week. This paper proposes to carry out a case study on the main consumers of compressed air in the containers in a company of wheat derivatives. Due to the ease of measurement and because they express actual calculated results, due to a constant operation, the compressed air consumption of the equipment and machines of the containers was calculated and later compared to the current situation. In view of the obtained results, a proposed situation was presented, seeking the optimization of this consumption and energy efficiency for the compressed air production of the industrial plant, the results also present the electrical energy savings with the changes suggested in this work.*

Palavras-chave: *Compressed air consumption, milling industry, energy efficiency, air compressors.*