

Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação: uma análise comparativa entre motor de indução trifásico x motor de imã permanente

Eng. Eduardo Thies (egthies@gmail.com)

Engenheiro eletricitista – Móveis Bertolini

Prof. Eng. Cícero Zanoni (czanoni@ucs.br)

Prof. Do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Caxias do Sul/CARVI

Resumo: No Brasil, não só a demanda por energia aumenta, mas existe um claro crescimento dos valores das tarifas médias aplicadas ao setor industrial, limitando ainda mais a competitividade do setor secundário. Desta forma, mesmo em setores industriais em que a energia elétrica não se apresenta como um item de custo elevado, é esperado que aumentem também as ações de racionalização do uso da energia. Nesta perspectiva, este trabalho apresenta um método de análise, dimensionamento e especificação da eficiência energética de um sistema de ventilação industrial empregado em uma indústria de móveis planejados. Para análise do desempenho energético de uso final foi empregada a metodologia PDCA, descrita pela Norma ISO 50.001, com o objetivo de obter indicadores para direcionar os esforços para reduzir custos com energia elétrica, com foco nos sistemas de exaustão. Os resultados obtidos com a combinação dos dampers automáticos e a variação de velocidade com motor de maior rendimento no sistema de exaustão foram considerados satisfatórios, visto a possibilidade do tempo de retorno de investimento ser menor do que o inicialmente projetado.

Palavras-Chaves: eficiência energética, motores, sistemas de exaustão.

Abstract: This paper presents a methodology for analysis, design and specification of the energy efficiency of an industrial ventilation system employed in an industry of customized furniture. To analyze the energy performance of the end use was employed PDCA methodology, described in ISO 5000, in order to obtain indicators to direct efforts to reduce electricity costs, focusing on exhaust systems. The results obtained with the combination of automatic dampers and change in greater efficiency motor speed with the exhaust system were satisfactory, since the possibility of return on investment of time to be smaller than originally designed.

Keywords: energy efficiency, electric motor, exhaust systems.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo consideravelmente. Isso se justifica em função do crescimento econômico experimentado nos últimos 6 anos e, conseqüentemente do aumento da distribuição da renda per capita da população brasileira.

Segundo dados preliminares do Balanço Energético Nacional - BEN de 2012 (ano base 2011), o consumo final de energia elétrica aumentou 2,6% [1]. É um valor menor do que o crescimento apontado em 2010, onde esse valor foi de 4,5%. No que diz respeito ao consumo industrial de eletricidade, os dados do BEN 2011 apontam que, aproximadamente, 60% da energia elétrica é utilizada apenas para funcionamento de sistemas motrizes, o que significa dizer que o maior consumo de eletricidade no setor industrial, deve-se às aplicações que envolvem conversão de energia elétrica em mecânica, representando um importante item nos custos de produção.

Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE 2030), divulgado pela Empresa de Planejamento Energético (EPE), nas próximas duas décadas o consumo de energia por parte do setor industrial brasileiro apresenta, mesmo que abaixo da média nacional, um crescimento expressivo. Neste trabalho são apresentados possíveis cenários econômicos mundiais e nacionais sobre os quais foram traçadas tendências do crescimento da demanda de energia no Brasil, correlacionados com os dados apresentados. Em todos os cenários apresentados, o consumo energético industrial no Brasil apresenta forte tendência de crescimento – valores entre 87,40% e 187,20% no período, dependendo do cenário apresentado. Não só a demanda por energia aumenta, mas existe um claro crescimento dos valores das tarifas médias aplicadas ao setor industrial brasileiro, limitando ainda mais a competitividade do setor secundário no Brasil.

Desta forma, mesmo em setores industriais onde a energia elétrica não se apresenta como um item de custo

elevado, é esperado que aumentem também as ações de racionalização do uso da energia no setor.

2. JUSTIFICATIVA

Entre os vários custos gerenciáveis de uma empresa, a energia vem assumindo uma importância crescente, motivada pela redução dos custos decorrentes do mercado competitivo, pelas incertezas das disponibilidades energéticas futuras e por restrições ambientais [2].

O elevado consumo apresentado pelos sistemas motrizes, os quais chegam a 28,5% do total do consumo nacional [3], torna este uso final o principal foco de atuação de programas de eficiência energética voltados ao setor industrial. Esses gastos com energia elétrica representam uma parcela significativa nos custos de produção, e conseqüentemente são fatores a considerar na otimização dos recursos.

O uso racional da energia elétrica pode ser enquadrado como uma das medidas de reduções de custos da empresa, visto que quando se faz necessário aumentar a produção isto implica em aumento de demanda e consumo de energia elétrica. Nem sempre esse aumento é planejado com a antecedência necessária a fim de prever um provisionamento anual completo, uma vez isto depende da demanda de consumo que o mercado impõe aos produtos. Nesse sentido, é comum haver um crescimento acima do esperado, e para compensar isso é possível adotar medidas preventivas a fim de evitar investimentos em infra-estrutura fabril que seriam necessários para cobrir esses acréscimos de produção, tais como aumento da demanda contratada, criação de horários alternativos como forma de diminuir as cargas instantâneas, substituição de gerador de energia (horário de ponta), entre outros.

No caso específico da indústria moveleira, onde foi realizado este estudo e implantação das medidas de eficiência energética motriz, o consumo médio mensal de energia é

decorrente da distribuição de cargas alimentadas, ilustrada na Figura 1.

Neste gráfico pode-se constatar que as maiores parcelas de consumo estão nos sistemas motrizes (MIT dos exaustores centrífugos e do compressor), sendo responsáveis por 50% do total das cargas. Confrontando os números nacionais com os do estudo de caso, considerando também os motores com potências inferiores à 5 cv, comprova-se que este percentual chega bem próximo aos 60% da média nacional.

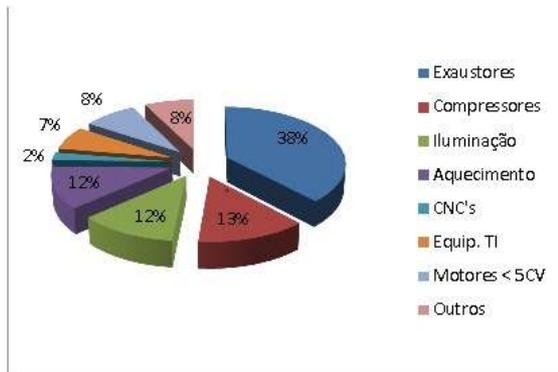


Figura 01: Distribuição de cargas de energia elétrica em uma indústria

3. OBJETIVOS

Como estudo de caso, serão aplicados os conceitos básicos da Norma ISO 50.001 em uma indústria de móveis planejados, descrevendo o processo de análise e, eventual troca de equipamentos ou inserção de novas tecnologias que possibilitem menor consumo de energia, sem perder produtividade ou afetar a qualidade dos produtos manufaturados. Desta forma, pretende-se que estes procedimentos possam ser replicados em outros setores industriais brasileiros.

Dentro do escopo deste trabalho, com propósito de gerenciamento do consumo de energia no ambiente industrial, a aplicação dos conceitos básicos da Norma ISO 50.001 servirá para obter indicadores a fim de direcionar os esforços para reduzir custos com energia elétrica, com foco nos sistemas de exaustão. Dado as suas parcelas de contribuição significativas no somatório das cargas consumidoras desta unidade, o objetivo principal foi, através da interpretação dos indicadores, atuar na implementação ou substituição tecnológica, diante das alternativas propostas, valendo-se da dinâmica do ciclo PDCA.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Motores Elétricos

Motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Os motores elétricos podem ser de motores de corrente contínua (C.C) e motores de corrente alternada (C.A.). Nos motores C.C. ou C.A., a conversão eletromecânica de energia se processa através da interação de campos magnéticos. Os princípios físicos básicos que explicam o funcionamento dos motores C.C. e dos motores C.A. são basicamente os mesmos e obedecem às

leis propostas por Ampère e por Faraday (indução eletromagnética) [5].

Em aplicações industriais, o motor mais empregado é o motor de indução trifásico (MIT). Este tipo de máquina ganhou grande espaço em diversas aplicações industriais devido à sua robustez, baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos [4]. Seu estator é formado por chapas de aço de alta qualidade e a superfície interna tem ranhuras para acomodar um enrolamento trifásico, cujos eixos dos fasores de tensão estão defasados de 120 graus elétricos.

A Figura 2 ilustra as possibilidades de construção dos motores de corrente alternada.

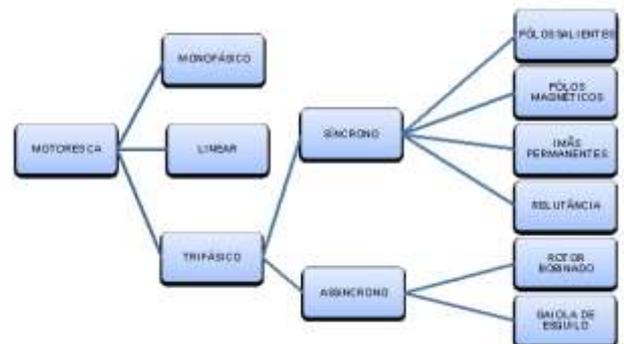


Figura 02: Tipos de motores elétricos de corrente alternada

4.1.1 Motores de indução trifásicos

O enrolamento do estator de uma máquina de indução é excitado com correntes alternadas, de forma que só o estator é ligado à rede de alimentação. O rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele, são induzidas eletromagneticamente pelo estator [4], daí o seu nome de motor de indução. O motor de indução pode ser visto como um transformador [5] generalizado em que a potência elétrica é transformada entre o rotor e o estator juntamente com uma mudança de frequência e um fluxo de potência mecânica.

Existem basicamente dois tipos de motor de indução, o de anéis - também chamado de rotor bobinado ou ainda rotor enrolado [6] - e o do tipo 'gaiola de esquilo', assim denominado primeiramente pelos americanos por ter sua estrutura semelhante ao de uma gaiola de esquilo - Squirrel Cage [4].

O motor de indução do tipo gaiola de esquilo, amplamente usado, é composto fundamentalmente por duas partes: rotor e estator. O enrolamento de um motor de indução ao qual a energia elétrica é conectada é distribuído ao redor do estator e produz no entreferro um campo magnético girante que roda em sincronismo com a frequência da rede elétrica. Conforme o campo magnético gira, o fluxo magnético "corta" os condutores dos enrolamentos do rotor gerando uma tensão elétrica nos mesmos e por consequência uma corrente nestes enrolamentos, a qual produz um fluxo magnético que se opõe ao criado no estator [7].

As correntes que circulam nas barras da gaiola de esquilo ou das bobinas são induzidas pelo campo magnético gerado no estator da máquina [6]. Os enrolamentos são na realidade barras sólidas de alumínio que são fundidas nas ranhuras do rotor, e colocadas em curto-circuito por anéis de cobre, ou alumínio nos de tamanhos menores. Diferentemente de uma máquina síncrona, o rotor em si de uma máquina de indução não gira em sincronismo; há um ‘escorregamento’ do rotor em relação ao fluxo síncrono da armadura, dando origem às correntes induzidas no rotor e, portanto, ao conjugado. Os motores de indução operam em velocidades inferiores à velocidade mecânica síncrona [5].

4.2 Carregamento de motores de indução

Um fator determinante nas análises dos motores já instalados ou a serem dimensionados, é saber qual potência de fato a aplicação exige, uma vez que o valor do rendimento em motores elétricos varia exponencialmente de acordo com a mesma. A essa variação de potência é dado o nome de percentual de carga dos motores [4], ou o quanto da potência nominal é realmente solicitada pelo processo. Assim, conhecer o rendimento torna-se indispensável para a análise do consumo de energia elétrica, pois a potência nominal dos motores elétricos refere-se à potência mecânica fornecida na ponta do eixo para movimentar a carga.

O método mais simples e por isso mais usual, para analisar a carga de motores é por meio da corrente de trabalho, comparando-a com os valores especificados em função do carregamento pelos fabricantes, e descrito na placa de identificação de cada motor. Essa medição é feita com multímetro alicate diretamente na caixa de ligação do motor ou na saída do dispositivo de manobra e/ou controle deste, como na Figura 3.



Figura 03: Medição da corrente de trabalho de um motor de indução

4.3 Rendimento e perdas

O rendimento nominal dos motores de indução trifásicos [4] define-se como sendo o “[...] percentual da potência de entrada convertida em potência mecânica”. O motor obtém o maior rendimento dentro da faixa de operação que vai de 80% a 110% da carga nominal. Desta forma, sempre que possível, deve-se evitar deixar o motor funcionando sob carga muito inferior à sua potência nominal,

uma vez que isto acarreta baixo rendimento e um baixo fator de potência, ambos indesejados.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \times 100 = \left(\frac{P_e - P_p}{P_e} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- η - rendimento do motor [%]
- P_m - potência mecânica útil no eixo [W]
- P_e - potência elétrica de entrada eixo [W]
- P_p - somatório das perdas [W]

O aumento percentual no rendimento dos motores trifásicos de indução (gaiola de esquilo) no decorrer dos anos foi fundamental para o início dos trabalhos de eficiência energética na indústria. A evolução tecnológica é ilustrada na Figura 4.



Figura 04: Evolução do rendimento dos motores elétricos de indução.
Fonte: WEG

A Portaria Interministerial nº 533, de 08 de dezembro de 2005, estabelece os níveis mínimos de eficiência energética dos motores elétricos de indução com rotor gaiola de esquilo, determinando um rendimento nominal mínimo que compreende uma faixa de 1 a 250 cv. Paralelo a isso, a Portaria nº 488, de 08 de dezembro de 2010, revisa os requisitos de avaliação da conformidade para esses motores e em seu artigo 4º estabelece [8] “[...] que a partir de 12 (doze) meses, contados da data de publicação desta Portaria, os motores elétricos de indução trifásicos rotor gaiola de esquilo, do tipo aberto, deverão ser fabricados e importados somente em conformidade com os Requisitos ora aprovados”.

4.4 Motores de ímãs permanentes

A partir da década de 80, com o advento dos ímãs de Neodímio Ferro Boro (NdFeB), de elevada energia, houve um aumento no número de aplicações industriais [4], como por exemplo as aplicações usando os motores síncronos de ímãs permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motor -PMSM) alimentados por inversor de frequência podem ser utilizados na indústria, onde a variação de velocidade com torque constante e alto desempenho são requeridos, como em compressores, ventiladores, etc. Os motores da linha "Wmagnet" do fabricante WEG, possuem ímãs permanentes de terras raras de NdFeB inseridos no rotor, ao invés da convencional gaiola de esquilo, eliminando assim a perda por

efeito joule no rotor [9], que responde por uma parcela significativa das perdas totais. Com isto, são obtidos níveis de rendimento muito superiores aos mínimos exigidos pela norma NBR-7094.

O motor de ímãs permanentes possui enrolamento de estator trifásico, similar ao motor de indução, e no rotor são montados os ímãs permanentes, conforme a Figura 5, ao invés da “gaiola de esquilo”.

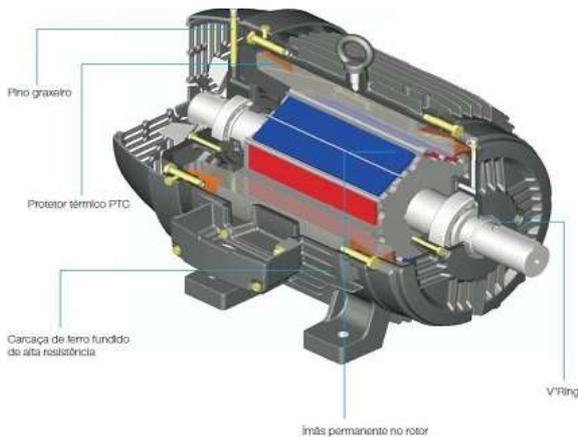


Figura 05: Detalhes do motor de ímã permanente WMagnet. Fonte: WEG

Estes motores não são projetados para serem ligados diretamente à rede elétrica, apresentando uma configuração única de seis polos e frequência elétrica variável. Os motores de 1800 rpm e 3600 rpm, apresentam, respectivamente, frequências de 90 Hz e 180 Hz, devendo ser acionados através de inversor de frequência conforme a Figura 6. Segundo a WEG Equipamentos Elétricos S/A [10]:

Os ímãs permanentes eliminam a necessidade de indução de corrente no rotor (corrente de magnetização), portanto, sem carga o motor apresenta um valor de corrente muito baixo, apenas para suprir as perdas. Além da corrente de magnetização, o motor Wmagnet também não necessita da compensação de escorregamento, pois a velocidade do eixo não varia com a carga.



Figura 06: Motor de ímãs permanentes e inversor de frequência: conjunto Wmagnet (fabricante WEG).

5. SISTEMAS MOTRIZES

A especificação e dimensionamento de um sistema motriz envolvem a seleção de um motor elétrico, o acoplamento motor-carga, seu acionamento e a forma de transmissão de energia para a carga. Este sistema é normalmente determinado pelo critério do menor custo inicial, não considerando os custos de operação do

equipamento durante sua vida útil. Além disso, há uma tendência generalizada de se especificarem motores com potência significativamente superior à necessária, por desconhecimento ou propositalmente, sob alegação de se manter uma potência de reserva que iria aumentar a confiabilidade do acionamento.

No que diz respeito aos sistemas motrizes sobredimensionados, as razões para tal seleção envolvem:

- Desconhecimento das características da própria carga e de métodos para determinação destas;
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança em várias etapas do projeto;
- Expectativa de aumento de carregamento;
- Desconhecimento de motores com fator de serviço;
- Permitir margem de segurança em processos vitais;
- Substituição de motores danificados por outros com potências maiores, devido à inexistência de motores de reserva iguais;
- Redução do nível de produção;

Por todos esses motivos, é imprescindível conhecer bem as características da carga a ser acionada, para depois sim, verificar se o sistema pode ser objeto de efficientização energética. O sistema motriz, como dito anteriormente compreende, além do motor elétrico, o seu acionamento envolvendo dispositivos de proteção, comando e controle, transmissão mecânica e a própria máquina acionada. Assim, o motor elétrico selecionado deve ter condições de acionar a máquina dentro das exigências de conjugado, potência e velocidade, atendendo ainda às características de confiabilidade, segurança, eficiência energética e vida útil elevada, entre outras.

Quando uma carga mecânica necessita de determinada potência, afirma-se que essa carga requer um determinado valor de conjugado a uma dada velocidade de rotação. Assim, matematicamente, existem inúmeras combinações de ω (velocidade mecânica, em rad/s) e de T_{mec} (torque mecânico, em N.m) de modo a resultar no mesmo valor de P_m (potência mecânica, em watt). A curva de conjugado em função da rotação apresenta tal dependência, sendo, portanto, uma característica fundamental para o processo de seleção do motor adequado ao acionamento, visando um funcionamento estável, econômico e satisfatório ao sistema.

6. VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DOS MOTORES ELÉTRICOS

Durante décadas as necessidades dos processos de aplicações industriais que exigiam velocidade variável eram limitadas pela tecnologia disponível, pelo custo e manutenção dos componentes empregados. Nestas condições, os sistemas mais utilizados com velocidade variável foram implementados com motores de indução de velocidade fixa, e necessitavam de um segundo dispositivo que utilizavam componentes mecânicos, hidráulicos ou elétricos.

No início dos anos 80, com o advento da eletrônica de potência e o barateamento de circuitos integrados, o dispositivo de conversão de energia elétrica para mecânica continuou sendo o motor de indução, mas os dispositivos

secundários foram substituídos por dispositivos eletrônicos de variação de velocidade, os quais foram chamados de inversores de frequência.

A velocidade síncrona de um motor de indução pode ser alterada pela mudança do número de pólos ou da variação da frequência da linha e o escorregamento pode ser mudado variando a tensão da linha, variando a resistência do rotor ou ainda aplicando tensões de frequência adequadas aos circuitos do rotor. Convém esclarecer que mesmo com todas as alternativas disponíveis para variação de velocidade, existem aplicações em que não se justifica a implementação de inversor de frequência e, por vezes a aplicação dá-se em conjunto com um redutor, o qual faz o acoplamento motor-carga, impondo também determinado torque.

Controlar a velocidade de um motor acionado por um inversor de frequência significa simplesmente programar ou colocar uma referência de velocidade numa entrada do inversor, sem ter informação real se essa velocidade programada está presente no eixo do motor [12]. Em sistemas que não requerem muita precisão ou que são acoplados a cargas conhecidas e constantes, o comando de velocidade pode ser suficiente para atingir as especificações projetadas.

No entanto, em sistemas que requerem maior precisão no valor da velocidade no eixo do motor é necessário inserir um sensor que informe, em um sistema de malha fechada, qual o valor real da 'variável' rotação da máquina. Os valores obtidos pelo sensor, realimentam um regulador no inversor que atuará no sentido de diminuir a diferença entre o valor desejado (programado) e o valor lido no eixo da máquina. É assim que o sensor, continuamente, está informando ao inversor o valor real da variável, para este poder corrigir dinamicamente o desvio do valor programado. Os inversores de frequência possuem basicamente duas estratégias para controlar a velocidade:

- a) Controle escalar: baseado na estratégia de comando chamada "V/F constante", que mantém o torque constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor;
- b) Controle vetorial: baseado no cálculo das componentes vetoriais que microprocessadores executam milhares de ciclos por segundo "Id" (corrente de magnetização - produtora de fluxo) e "Iq" (corrente produtora de torque).

O motor de indução submetido a uma tensão senoidal PWM, proveniente de um inversor de frequência, estará sujeito a tensões harmônicas (componentes de frequência acima da frequência fundamental). Dependendo da frequência de chaveamento e de particularidades do controle, o motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído e perda de rendimento.

Não existe normalização quanto aos valores limites de distorção harmônica de tensão e corrente [12], nem tampouco uma norma que especifique o procedimento de ensaio do rendimento do sistema (inversor + motor). Contudo, a experiência adquirida até o momento, permite que se façam as seguintes considerações:

- O motor de indução, quando alimentado por um inversor de frequência PWM, tem seu rendimento diminuído, em relação a um motor alimentado por tensão puramente senoidal, devido ao aumento nas perdas ocasionadas pelas harmônicas;
- Em aplicações de motores de indução de gaiola com inversores de frequência, porém, deve ser avaliado o rendimento do sistema (conjunto inversor + motor) e não apenas do motor;
- Cada caso deve ser analisado em particular, para serem consideradas as características do inversor e do motor, tais como: frequência de operação, frequência de chaveamento, condição de carga e potência do motor, taxa de distorção harmônica do inversor;
- O aumento da frequência de chaveamento diminui o rendimento do inversor e aumenta o rendimento do motor;
- Motores de alto rendimento alimentados por inversores de frequência mantem seu rendimento superior, em comparação com motores standard alimentados por inversores.

Em termos de qualidade de energia, ainda é aconselhável coletas de medidas das distorções harmônicas da planta fabril antes da implementação de inversores de frequência de maior porte. Existem considerações normativas sobre rendimento de motores alimentados por inversor de frequência. É o caso da "MG1 Part 30", da Norma NEMA, a qual indica que o rendimento do motor cairá, quando operado em um controle.

Os harmônicos presentes elevarão as perdas elétricas, que reduzirão o rendimento e acarretarão aumento também da temperatura do motor, reduzindo ainda mais o rendimento do motor. Já a IEC 60034-17 [12], diz que:

As características de desempenho das aplicações com motores de indução alimentados por inversores de frequência são influenciadas por todo o sistema, compreendendo a fonte de alimentação, o inversor, o motor, a carga mecânica e o equipamento de controle. Devido à complexidade das interações técnicas entre os sistemas e as várias condições de operação, está fora do escopo da especificação técnica a quantificação de valores numéricos relacionados com tais aplicações. Não existe método simples para calcular as perdas adicionais e não pode ser feita qualquer afirmação genérica sobre seu valor.

Uma comparação em termos de rendimento e velocidade pode ser feita levando em conta os motores de indução trifásicos e os motores de ímãs permanentes, conforme a Figura 7.

O exemplo é de um motor de 200 cv – 3600 rpm, de um compressor. A linha mais escura representa a curva de rendimento do motor de ímãs permanentes ao variar a velocidade. Em comparação com o MIT, nota-se um melhor rendimento em todas as faixas de frequência.

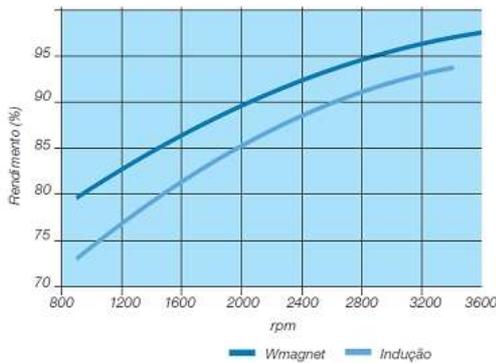


Figura 07: Comparativo de rendimento x rotação entre um motor de indução e um motor de ímã permanente. Fonte: WEG

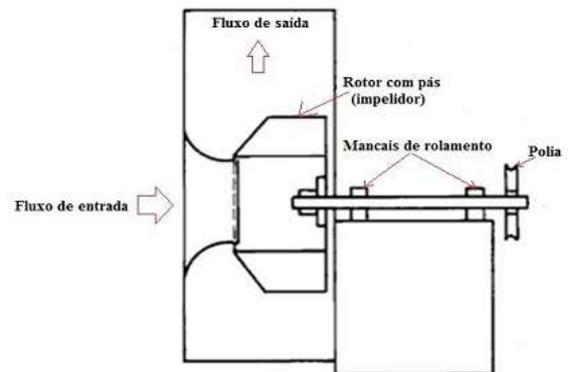


Figura 08: Ventilador centrífugo com transmissão por correias e polias

7. VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

A ventilação industrial é a operação realizada por meios mecânicos que visa o controle de parâmetros [13], tais como temperatura, distribuição do ar, umidade, e eliminação de agentes contaminantes ou poluentes, entre eles: gases, vapores, poeiras, névoas, microorganismos e odores.

Os sistemas de ventilação se classificam em sistemas de ventilação geral e em sistemas de ventilação local exaustora. O sistema de ventilação geral, como o próprio nome induz, proporciona a ventilação de um determinado ambiente, de um modo geral e global. O sistema de ventilação local exaustora realiza-se com um equipamento captor de ar próximo à fonte poluidora [14], isto é, que produz poluente nocivo à saúde, de forma a remover o ar da fonte poluidora para a atmosfera. O ar da fonte poluidora é removido através de sistema de exaustão, devendo ser tratado, com a finalidade de ser convenientemente entregue à atmosfera, sem qualquer risco de poluição ambiental.

Segundo a ABNT – NBR 10131, de 1987, os ventiladores se classificam de acordo com a forma do rotor em: centrífugos ou radiais, mistos e axiais [14].

7.1 Ventiladores centrífugos

Um ventilador centrífugo consiste em um rotor com pás chamado impelidor, uma carcaça de conversão de pressão e um motor de acionamento. O ar entra no centro do rotor em movimento de entrada [15], sendo acelerado pelas pás e impulsionado da periferia do rotor para fora da abertura de descarga.

Os ventiladores centrífugos podem operar [16] pequenas vazões e grandes pressões. Nestes a trajetória de uma partícula no rotor se realiza em uma superfície que é um plano perpendicular ao eixo. Um exemplo é visto na Figura 8.

Normalmente, as instalações dos ventiladores operam com rotação constante e para variar a vazão, no caso para diminuir, são utilizados dampers¹ que fecham os dutos nos pontos de captação ou dutos principais.

7.1 Eficiência através de estratégias de controle de vazão

Tipicamente, uma vez que um sistema de exaustão foi projetado e instalado, o exaustor opera a uma velocidade constante. Na prática, há ocasiões em que uma mudança na vazão é desejável, pois são adicionados ou retirados pontos de captação de resíduos. Normalmente o fluxo de ar deve ser aumentado por inclusão de equipamentos que necessitam de captação de pó e a redução no fluxo acontece quando há ociosidade dos equipamentos onde aconteceria a captação [13]. Para variar o fluxo de ar nos dutos do sistema de exaustão, podem ser usados os seguintes métodos:

- Mudança na relação de transmissão motor versus rotor: a troca de polias da relação é a maneira mais simples de variar a vazão. Só é adotada quando uma alteração de volume do ventilador é necessária em caráter permanente, dado o trabalho envolvido nesta alteração;
- Controle com damper: alguns ventiladores centrífugos são projetados com a possibilidade de regular a vazão fechando ou abrindo dampers na saída ou entrada do ventilador, mudando assim a curva característica do sistema;
- Palhetas na entrada do rotor: são palhetas de seções curvas posicionadas na entrada do ventilador. Quando estão abertas o fluxo é máximo, e ao se fecharem, criam uma turbulência na entrada do alojamento do rotor que muda as características da curva de ventilador;
- Acionamento por velocidade variável: é o método mais caro, porém o que oferece infinitas possibilidades de velocidade de vazão dinamicamente. Ao reduzir a velocidade do ventilador para necessidades de fluxo menores, reduz-se também em relação cúbica a potência do motor.

A Figura 9 ilustra uma comparação entre os métodos de controle de vazão em relação ao consumo de energia. A análise deste gráfico comparativo, indica que o método de

¹ Dampers: são registros conhecidos como válvulas de controle de vazão ou fluxo. Podem ser manuais ou automáticos, dependendo do sistema e da eficiência que dele se espera.

controle de velocidade é o que mais se aproxima da curva da potência requerida pelo ventilador. Assim, a possibilidade de operar o ventilador em velocidade variável caracteriza-se numa forma de melhorar a eficiência energética dos sistemas de ventilação. A partir do desenvolvimento da eletrônica de potência é possível substituir métodos clássicos de controle de vazão (damper), por acionamentos de velocidade variável, ou ainda aliar os dois métodos em conjunto com um transdutor de pressão no duto principal. Ao se utilizar o acionamento eletrônico, é muito importante conhecer a característica conjugado-velocidade da carga, para uma correta especificação do sistema de acionamento.

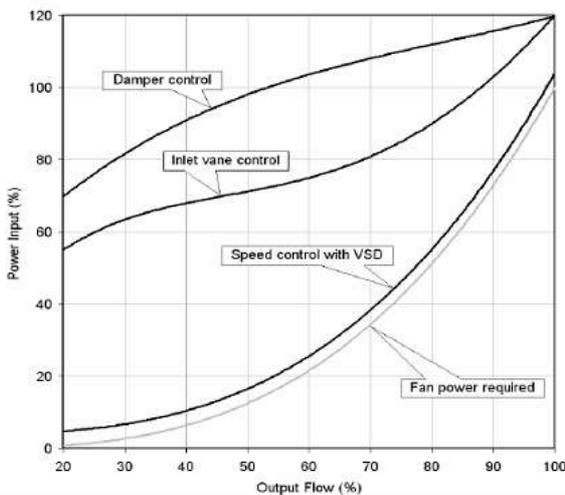


Figura 09: Comparação entre métodos de controle de vazão

Para contemplar este efeito, a curva característica do ventilador, conseqüentemente, deverá ser recalculada para uma condição média de operação [16]. Este procedimento é realizado recorrendo-se à definição da pressão total e às relações de similaridade das máquinas de fluxo. As equações resultantes são chamadas de Leis dos Ventiladores. Essas leis estabelecem [17] uma relação linear, quadrática e cúbica de vazão, pressão e potência em relação à rotação, e são mais frequentemente usadas para calcular mudanças na vazão, pressão e potência de um ventilador quando o seu tamanho, velocidade ou densidade do fluido forem alterados.

Assim, tal tese considerando primeiramente apenas mudanças na rotação (sistema constante) em determinado ventilador e em determinado sistema utilizando ar numa dada densidade, resulta nas equações simplificadas as seguir:

$$Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (3)$$

$$W_2 = W_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (4)$$

Onde:

P – pressão (total, estática ou dinâmica);

Q – vazão;

N – rotação do ventilador;

W – potencia do ventilador.

8. METODOLOGIA

Diante deste cenário, para minimizar os impactos na produção, reduzindo o valor da fatura de energia elétrica, propõe-se utilizar os preceitos básicos da norma ISO 50.001 para realizar estudos de melhorias em eficiência energética com enfoque nos sistemas de exaustão, por serem estas as maiores cargas nominais instaladas na fábrica. Para isso, serão detalhados a seguir, os passos do ciclo PDCA dentro do contexto deste estudo de caso.

8.1 Planejar

O planejamento das ações visa estabelecer as análises técnicas e econômicas que serão realizadas na etapa do diagnóstico. Nesta etapa também é criada a linha de base do diagnóstico, isto é, relata-se as condições operacionais atuais dos sistemas a serem analisados em termos de serviço prestado e consumo de energia.

8.1.1 Perfil atual de energia

Neste estudo de caso, a identificação das maiores cargas e a análise dos perfis de operação, foram feitas por meio de medições de corrente de consumo das cargas no quadro geral de distribuição.

As cinco linhas de exaustão juntas somam 187,5 kW de potência nominal instalada, tendo suas partidas acionadas por soft-starter². Logo após partir o MIT, este dispositivo não tem mais atuação sobre o funcionamento do motor, ou seja, independentemente se há a necessidade de sucção a ser feita ou não, irá operar na velocidade nominal. Tem-se aí, um ponto a melhorar. Na Figura 10, vê-se uma foto de um dos ventiladores centrífugos antes da montagem dos dutos.



Figura 10: Exaustor centrífugo motor de 45 kW (VENTO675).

² Softstart – Dispositivo eletrônico usado para controlar a partida de motores efetuando-a de forma suave, assim como o próprio nome sugere

Os ventiladores realizam a sucção do pó de diversas máquinas distribuídas em toda fábrica, com tubulações que foram sendo alteradas ao longo dos anos conforme crescimento da área de ocupação da fábrica e inclusão de equipamentos que necessitavam de exaustão. Em consequência disso, a análise de todas as linhas se torna um pouco complexa porque em alguns pontos da rede existe a passagem de dutos de exaustão de um mesmo exaustor que passam por setores diferentes. Por isso a análise inicial será feita em uma linha em específica de 45 kW. Esse ventilador é exclusivo de duas máquinas somente, instaladas em 2008.

Utilizando apenas um multímetro alicate, pode-se ver que a corrente de consumo deste motor é 64,8 A, sendo a corrente nominal do motor para esta tensão nominal 81,3 A obtêm-se um fator de carregamento de aproximadamente 78,5%.

Em estudo inicial, percebeu-se que o exaustor com motor de 45 kW, nomeado como VENT0675, que realiza a sucção do equipamento da Linha Esquadradobas B4 (apresentado na Figura 10), apesar de operar em dois turnos inicialmente, permanece um período de tempo considerável em que a sucção não necessitaria estar sendo efetuada, pois os equipamentos atendidos por esse sistema de exaustão estão em regime de setup, limpeza ou ainda manutenção. Ainda existe a possibilidade de fechamento localizado por grupo deste equipamento, ou seja, conforme o tipo de peça a ser feita neste equipamento alguns grupos não teriam necessidade de operação, podendo então ter seus respectivos dutos fechados. Existem também alguns dutos correspondentes específicos de limpeza, que poderiam ser abertos somente no momento de limpeza da máquina.

Neste contexto, podem ser analisadas várias hipóteses de controle, verificando a viabilidade econômica de cada uma delas:

- Implementar o fechamento automático dos bocais e, em conjunto, variar a velocidade do motor, utilizando controle eletrônico de velocidade que possua entradas digitais, levando em conta um controle que use uma entrada de tempo real em determinados horários (por exemplo, horário de ponta);
- idem ao anterior, com fechamento dos dutos principais, ou seja, fechando o duto principal na entrada de cada equipamento, assim, sem necessitar de um controle individual sobre cada bocal de captação do pó;
- implementar o fechamento dos bocais e, em conjunto, variar a velocidade do motor, utilizando um controle em malha fechada com transdutor de vazão no duto mestre da tubulação de exaustão;
- estudar viabilidade e tempo de retorno de investimento de outro tipo de motor que possua rendimento superior (e potência a ser definida), implementando além dos dampers automáticos nos dutos principais, o controle de velocidade. Se a hipótese for escolhida, ainda poderão ser realocados os motores, retirando assim do processo o de menor rendimento dentre todas as linhas de exaustão.

O estudo de viabilidade econômica e eficácia das hipóteses deverá contemplar um monitoramento dos tempos efetivos de produção de cada máquina, ou seja, identificar e quantificar os tempos em que as máquinas poderiam estar com a exaustão inoperante. Deve-se levar em conta também que a linha base de consumo é influenciada pelo acréscimo de cargas e/ou aumento dos níveis de produção, porém pode-se estipular que ao final do estudo de caso, as ações de eficiência energética sejam suficientemente capazes de suprir qualquer acréscimo de carga ou aumento de produtividade.

9. DESENVOLVIMENTO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

9.1 Implementação do plano de ação

A implementação do plano de ação envolve uma série de medidas para obtenção de resultados eficazes. Através das análises das hipóteses de controle do sistema de exaustão apresentadas no item 5.1.1, o controle por damper automático nos dutos principais foi o passo inicial, em seguida fez-se o estudo e implementação da variação de velocidade com substituição tecnológica do motor em questão. Esses passos são detalhados a seguir.

9.1.1 Controle do sistema de exaustão por damper

Nas duas máquinas em que o exaustor de 45 kW realiza a sucção do pó, denominadas pelos números 0710 e 0720, um monitoramento foi realizado colocando-se um horímetro, o qual somava o tempo em que haviam peças a serem processadas no interior de cada máquina, por meio de sinal identificado no CLP desta. Estas amostras foram feitas em dias aleatórios de produção, contemplando produções de peças diferentes, em que o tempo de *setup* pode variar.

Os resultados apontaram a possibilidade de fechamento total dos bocais em 33% do tempo nas duas máquinas em que este exaustor de 45 kW realiza a sucção do particulado. Em seguida, para efetuar a medição com analisador de energia, foi feito o fechamento manual do duto (simulando um damper) que realiza a sucção de apenas um dos dois equipamentos. A análise, resultou nos gráficos ilustrados na Figura 11.

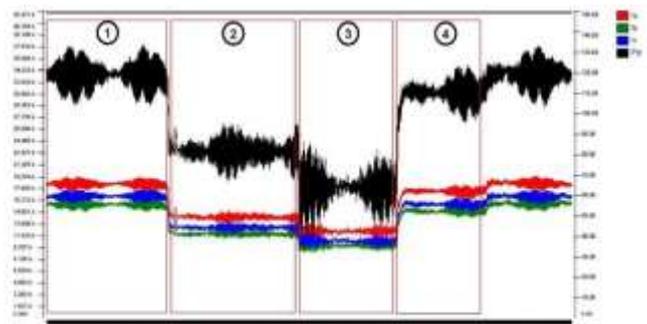


Figura 11: Leitura de potência e corrente por fase, em tempo real.

Foram obtidos com o fabricante dados do cálculo utilizado para determinação de potência necessária na

instalação, a qual foi de 53 cv (39 kW). Estes resultados foram planejados, resultando assim a TABELA 01.

Tabela 01: Potência consumida em cada situação de operação numerada.

| Medição | Situação | Potência Cons. (kW) |
|---------|---|---------------------|
| 1 | Sistema em plena carga | 33,7 |
| 2 | Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0710 | 23,2 |
| 3 | Fechamento total (0710 e 0720) | 18,1 |
| 4 | Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0720 | 31,3 |

Com o teste de fechamento manual foi possível constatar que esta medida imediata seria viável, sem grandes investimentos e, assim, a implantação do *damper* automático foi efetuada nos dutos principais das duas máquinas atendidas pelo exaustor de 45 kW (máquinas 0710 e 0720) (Figura 12). Diferentemente do teste manual, onde uma chapa de metal obstruiu totalmente a sucção, no *damper* com atuador pneumático é necessário manter uma distância de segurança (de 3 a 5 mm) entre a chapa metálica de obstrução e as paredes internas do duto. Por essa abertura que percorre toda circunferência interna dos dutos, ocorrem perdas de sucção e, portanto, o resultado do consumo de corrente do motor com fechamentos simultâneos dos dois equipamentos resultou em 43A, ou seja, um valor pouco maior do que os 40A encontrados com os fechamentos simultâneos feitos de forma manual.



Figura 12: Dampers automáticos com atuador pneumático (Maq. 0710).

O objetivo de implantar o *damper* automático é obter um regime de trabalho que independa da ação dos operadores da máquina, pois como visto na Figura 12, são inúmeros bocais que deveriam ser controlados, assim, corre-se o risco de haverem falhas involuntárias (o operador poder esquecer de atuar um ou mais dampers) e isso comprometeria os resultados. As tecnologias atuais usadas em empresas européias adotam este fechamento dos dutos aliado à variação de velocidade através de controle com inversores de frequência. Esta análise deve ser feita baseada na Lei das Afinidades, que rege o comportamento dos ventiladores centrífugos [17].

9.1.2 Hipóteses combinadas para o controle do sistema de exaustão

Com a implementação do fechamento automático dos bocais principais já em operação e com resultado positivo constatado em medições de corrente de consumo do motor de indução do exaustor VENT0675, o passo seguinte foi estudar a viabilidade de implantação do controle de velocidade com o motor existente ou com um motor de tecnologia mais recente, com rendimento superior ao atual, reduzindo assim o tempo de retorno de investimento.

Para inserir a variação de velocidade controlada por inversor de frequência no sistema VENT0675, é necessário adquirir o inversor de frequência, independentemente de usar o motor atual ou outro de maior rendimento e/ou potência diferente. Para esse estudo foram feitos os seguintes orçamentos:

- inversor de frequência para motor com potência nominal de 60 cv;
- motor de maior rendimento disponível no mercado: ímãs permanentes;
- motor de maior rendimento com potência nominal diferente do motor atual
- (MIT de 60 cv), a ser estudado qual valor que possa vir a suprir futuramente demanda maior em parque fabril novo.

Assim, fez-se estudo com fornecedores de motores de rendimento acima do atual motor, e diante das situações de demanda do processo, foram apresentadas propostas de fornecimento de motor com maior rendimento e de potências diferentes, sendo ofertado o motor síncrono de ímãs permanentes. Este motor possui rendimento 96,5 %, contra 93% dos motores de indução gaiola de esquilo de mesma capacidade instalado nessa aplicação. O consumo estimado pelo fabricante, optando pela inclusão da variação de velocidade, está exposto na Tabela 02 com dados estimados pelo fabricante do motor Wmagnet

Tabela 02: Dados estimados pelo fabricante do motor Wmagnet.

| Situação | Consumo c/ dampers (kW) | Consumo c/ variação velocidade (kW) |
|--|-------------------------|-------------------------------------|
| Sistema em plena carga | 33,7 | 32 |
| Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0710 | 23,2 | 11,4 |
| Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0720 | 31,3 | 14,2 |
| Fechamento total (<i>dampers</i> 0710 e 0720) | 18,1 | 11,4 |

Fonte: WEG

Aplicando uma média ponderada levando em conta os dados da Tabela 02I e os valores de demanda do processo (obtidos com horímetro instalado em cada máquina), obtém-se um consumo médio de 20,27 kW, contra 26,5 kW do sistema de fechamento com dampers. O estudo pode ser compreendido melhor analisando o quadro representado na Tabela 03, que apresenta um resumo das possibilidades com alguns resultados esperados considerando a situação daquele momento.

Tabela 03: Resumo da proposta: damper com variação de velocidade.

| RESUMO DA PROPOSTA | | | | |
|---|------------|------------|--|-----------|
| Indicadores | Antigo | Com damper | Com damper aliado a variação de velocidade | |
| Custo unitário (R\$/kWh) | | | 0,265 | |
| Dias operação / ano | | | 260 (3900hs) | |
| Horas de operação/ dia | | | 15 | |
| Alternativas propostas | - | Automático | Wmagnet Drive System | |
| | | | 60 cv | 75 cv |
| kWh consumido | 33,7 | 26,5 | 20,75 | 20,27 |
| Consumo anual (kWh) | 131.430,00 | 103.350 | 80.925,00 | 79.053,00 |
| Redução consumo de energia (kWh/ano) | - | 28.080,00 | 50.505,00 | 52.377,00 |
| Redução de consumo de energia (R\$/ano) | - | 7.441,20 | 13.383,83 | 13.879,91 |
| Economia com remanejo de motores | (kWh/ano) | - | - | 7.683,00 |
| | (R\$/ano) | - | - | 2.035,96 |
| Venda de motor usado 60 cv (R\$) | - | - | 2.000,00 | 2.000,00 |
| Investimento previsto (R\$) | - | 1.000 | 28.330,00 | 32.665,70 |
| Retorno de investimento (anos) | - | < 2 meses | 2,1 anos | 1,9 anos |



Figura 13: Dados de placa do motor de ímã permanente implementado. Fonte: Autor

Tabela 04: Lógica de controle de velocidade do motor

| Rotação motor (RPM) | 300 | 1200 | 1400 | 1800 |
|---------------------|-----|------|------|------|
| Frequência (Hz) | 15 | 60 | 70 | 90 |
| Sinal máquina 0710 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Sinal máquina 0720 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Este estado por sua vez, é determinado por duas condições: esteira transportadora ligada e presença de peças no interior da máquina. A combinação desse estado das duas máquinas nas entradas do programa irá definir qual saída atuará do CLP, que por sua vez são as entradas de velocidade do motor de frequência. Os parâmetros de velocidades do motor foram estabelecidos no inversor de frequência por teste empírico. O inversor de frequência, display e demais dispositivos inseridos no painel elétrico podem ser vistos na Figura 14 e o motor de ímãs permanentes é visto na Figura 15.



Figura 14: Painel elétrico externo (coluna esquerda) e interno da implementação (coluna direita).

No item 5.1.1, na descrição das hipóteses de controle para o sistema de exaustão, não foi considerada a hipótese de controle de velocidade com inversor de frequência utilizando o MIT atual de 60 cv, pois haveria o risco de a implementação resultar em uma perda de rendimento do motor, conforme estudos apresentados [12], pois a aplicação em questão exige uma faixa de frequência baixa em uma situação específica que não tenha necessidade de sucção em nenhuma das duas máquinas. Além disso, com a inserção de um motor novo seria possível um remanejo de motores usados, tirando de uso um dos motores de indução mais antigos, fabricado de 1987.

Outra consideração é que o tipo de motor escolhido para substituição, só pode ser alimentado através do inversor de frequência por possuir configuração fixa de seis pólos. Logo, o custo considerado na Tabela 03 inclui o inversor de frequência para controlar o motor.

9.1.3 Implementação do controle de velocidade

A partir dos resultados esperados, optou-se pelo motor de 75 cv por ter o menor tempo de retorno e garantia de rendimento superior ao motor de indução trifásico. Também com o objetivo de aproveitar esse mesmo sistema em um futuro parque fabril, onde há possibilidade da potência necessária ser maior do que os atuais 60 cv.

Os dados técnicos deste motor podem ser vistos na Figura 13. No detalhe, a data de fabricação de janeiro de 2012.

Para controlar a velocidade do exaustor por meio de sinal das duas máquinas atendidas pelo sistema de exaustão, de forma a atuar o damper e, simultaneamente, variar a velocidade conforme as quatro situações possíveis, foi instalado no painel elétrico do inversor de frequência um CLP. Para esse CLP, criou-se um programa que recebe na entrada os sinais 0 e 24 Vdc de acordo com o estado de operação das duas máquinas. Neste programa em ladder, a impostação de valores de velocidade para o inversor obedece à lógica binária conforme Tabela 04.



Figura 15: Motor instalado no VENT0675.

$$N_M \times D_{PM} = N_R \times D_{PC} \quad (5)$$

Onde:

N_M – Velocidade do motor;

N_R – Velocidade do rotor

D_{PM} – Diâmetro da polia motora (acoplada ao motor)

D_{PC} – Diâmetro da polia conduzida (acoplada no mancal comum ao rotor)

Desta forma, para a aplicação em questão, obtém-se o seguinte valor para velocidade do rotor:

$$1780 \times 255 = N_R \times 280 \Rightarrow N_R = 1620 \text{rpm}$$

Como a polia motora era de diâmetro menor, durante todo o primeiro mês (março) o sistema operou com a velocidade do rotor reduzida, com valores obtidos através de (5):

$$1800 \times 255 = N_R \times 280 \Rightarrow N_R = 1640 \text{rpm}$$

Assim, a exaustão mesmo de forma visual mostrou-se insuficiente na captação do pó das duas máquinas. E para ter-se um parâmetro mensal, a recolocação da polia foi feita somente após um mês de operação do sistema com motor de ímãs permanentes, obtendo assim um histórico de consumo que pudesse ser usado em termos de comparações entre polias motoras de diferentes diâmetros, num período de amostragem que englobou todas as possíveis situações de produção.

Para montagem dos resultados obtidos, no mesmo formato de quadro resumo da estimativa apresentada na Tabela 03, foram coletadas informações mais reais possíveis quanto:

- dias úteis que a empresa trabalha por ano: são 245 dias, já descontadas as férias coletivas;
- operação diária de 19 horas no mês de março, onde a média de horas/dia foi feita através do somatório de horas dos dois turnos de trabalho (descontadas duas horas de operação do gerador), com as horas extras semanais;
- operação diária 21 horas no mês de abril, onde a média de horas/dia aumentou devido ao início de um terceiro turno de trabalho;
- em relação ao resumo da proposta apresentado na Tabela I, o investimento necessário para a colocação do sistema em funcionamento aumentou, pois foram contabilizados os valores do CLP, armário elétrico, dispositivos de manobra e demais dispositivos de controle;
- através dos parâmetros “Contador de kWh” (P044) e “Número de horas em operação” (P043) do inversor de frequência CFW-11 foi possível obter

10. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Algumas implementações existentes no mercado são feitas com a utilização de um transdutor de vazão fixado na tubulação principal. Isto se aplica de forma usual quando o sistema realiza sucção de várias máquinas. Assim, se houver fechamento ou abertura dos dutos (automático ou manual) o transdutor de vazão informa para o controle que houve uma diferença de vazão na rede, e a lógica de controle atua, aumentando ou reduzindo a velocidade. Porém, a atuação dos *dampers* deve anteceder essa ação. Considerando que o custo do transdutor de vazão orçado foi de R\$5.800,00 e nesse estudo de caso são somente duas máquinas que influenciam o controle de tomada de decisão (qual velocidade o exaustor deve operar?). A informação é considerada direta, pois ao mesmo tempo em que o sinal da máquina atua o *damper*, envia o sinal para o CLP. Este, por sua vez, através do programa irá atuar suas saídas correspondentes, que são as entradas *multi speed*³ do inversor de frequência. Elimina-se a necessidade do transdutor, porém caracteriza mesmo assim um sistema autônomo, que independe do fator humano.

10.1 Variação de velocidade

A Tabela 03 foi uma estimativa, porém o realizado foi diferente porque no momento da instalação foi utilizada uma polia motora de menor diâmetro. Isso porque para poder usar a mesma polia, foi necessário modificar as suas dimensões devido a diferença da carcaça entre o MIT de 60 cv (carcaça 225) e o motor modelo Wmagnet de 75 cv (carcaça 200). Estes resultados podem ser vistos na Tabela 05.

Tabela 05: Resultado parcial, com polia motora menor

| Situação | Consumo (kW) | |
|---|------------------------|-------------------------------------|
| | somente <i>dampers</i> | <i>damper</i> + variação velocidade |
| Sistema em plena carga | 33,7 | 12 |
| Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0710 | 23,2 | 10 |
| Fechamento do <i>damper</i> da máquina 0720 | 31,3 | 4,5 |
| Fechamento total (<i>dampers</i> maqs 0710 e 0720) | 18,1 | 0,2 |

A rotação do rotor do exaustor é dada por (5) a seguir.

³ *multi speed* – termo em inglês que significa várias velocidades. O fabricante WEG assim nomeou as entradas possíveis (neste caso 6 diferentes) com nome de “*multi speed*”.

o valor da potência média de 10,77 kW, fazendo a divisão conforme (6):

$$\text{Potência Média (kW)} = \frac{\text{Parâmetro P044}}{\text{Parâmetro P043}} \quad (6)$$

Inserindo os valores em (6), obteve-se:

$$\text{Potência Média (kW)}_{\text{Março}} = \frac{4868 \text{ kWh}}{451,6 \text{ h}} = 10,778 \text{ kW}$$

$$\text{Potência Média (kW)}_{\text{Abril}} = \frac{6828 \text{ kWh}}{426,8 \text{ h}} = 16 \text{ kW}$$

Com esse valor e levando em conta as demais considerações necessárias já citadas, é apresentada a Tabela 06, com objetivo de analisar o tempo de retorno de investimento real para cada situação, sempre comparando com a situação antiga de potência consumida de forma contínua de 33,7 kW e o panorama do mês atual.

Tabela 06 – Resumo da implementação damper + variação de velocidade.

| Indicadores | Março | Abril |
|---|---------------------|-----------------------|
| Custo unitário (R\$/kWh) | 0,265 | 0,265 |
| Dias operação / ano | 245 dias (4655hs) | 245 dias (5145hs) |
| Horas de operação/ dia | 19 | 21 |
| Alternativa implantada | Wmagnet 75 cv | Wmagnet 75 cv |
| Média em kWh | 10,75 (polia menor) | 16 (polia 'original') |
| Consumo anual (kWh) | 50.041,25 | 82.320 |
| Redução em relação ao sist. antigo (kWh/ano) | 106.832,25 | 91.066,5 |
| Redução consumo de energia (R\$/ano) | 28.310,54 | 24.132,62 |
| Economia com remanejamento de motores (R\$/ano) | 13.965,00 | 15.435,00 |
| | 3.700,73 | 4.090,27 |
| Venda de motor usado 60 cv (R\$) | 2.000,00 | 2.000,00 |
| Investimento realizado (R\$) | 36.665,70 | 36.665,70 |
| Retorno de investimento (anos) | ≈ 1,08 | ≈ 1,21 |
| Redução em emissão de CO2 (t/ano) ⁹ | 11,28 | 9,62 |

A média de 16 kWh obtida no mês de abril é o panorama definitivo, pois quando há sucção nas duas máquinas o rotor do sistema de exaustão está girando na mesma velocidade antiga, ou seja, velocidade nominal quando o motor está em 1800 rpm. Dados coletados no início e fim dos primeiros seis meses amostrados, indicaram também outros valores que apresentam valores concretos de economia acumulada, conforme a Tabela 07.

Uma implementação auxiliar foi feita através dos valores dos tempos de uso de cada máquina, fornecendo aos gestores da produção dados percentuais de quanto tempo cada máquina está operando de fato, visto que os sinais coletados nos contadores do programa elaborado no CLP indicam valores individuais de cada equipamento operando, valores em que o equipamento está inoperante (não separa se é por setup de máquina, limpeza ou manutenção) e ainda valores totais de operação. Com isso, obtêm-se valores percentuais de utilização do equipamento, que podem ser usados como sendo o rendimento da máquina.

Tabela 07 – Economia efetiva acumulada nos primeiros seis meses.

| Mês | Potência média [kW] | Horas trabalhadas [hs] | Consumo evitado [kWh] | Economia efetiva [R\$] |
|--------|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Março | 10,75 | 451,6 | 10.364,22 | 2.746,51 |
| Abril | 16,44 | 433 | 7.664,1 | 2.030,98 |
| Mai | 16,18 | 516,6 | 9.143,83 | 2.423,11 |
| Junho | 13,91 | 468,7 | 9.275,57 | 2.458,02 |
| Julho | 14,50 | 511 | 9.806 | 2.598,77 |
| Agosto | 12,60 | 540 | 11.394 | 3.019,41 |
| TOTAL | 14,06 (média) | 2.920,9 hs | 57.647,72 kWh | R\$15.276,8 |

10.2 Remanejamento de motores

Foram remanejados dois motores, retirando assim do processo o de menor rendimento dentre todas as linhas de exaustão, um MIT do sistema de exaustão VENT732.1, o qual possui tecnologia antiga empregada na sua fabricação em 1987, época em que o rendimento não era item obrigatório a constar nas placas de identificações dos motores.

A maioria dos fabricantes possui um sistema a base de troca, onde o cliente entrega seu motor usado na compra de um motor novo, e é o que pode ser levado em consideração neste caso.

No sistema de exaustão deste motor, foi colocado o motor que até então estava no VENT0675, um MIT com rendimento de 93%. A corrente elétrica de consumo do motor antigo era de 64 A, e efetuando a troca, mantendo todas as demais características do conjunto inalteradas, este consumo baixou para 58 A. Adaptando (7) para cada caso, tem-se as duas situações:

$$P(kW) = \frac{\sqrt{3} \times I \times V \times \cos \phi}{1000} \quad (7)$$

- a) Para o motor antigo (MIT 60 cv de 1987 – rendimento nominal desconhecido)

$$P(kW) = \frac{\sqrt{3} \times 64 \times 380 \times 0,87}{1000} = 36,66 \text{ kWh} \quad (8)$$

- b) Para o motor retirado (MIT 60 cv de 2008 – rendimento nominal de 93%) do ponto em que foi colocado o motor de ímãs permanentes:

$$P(kW) = \frac{\sqrt{3} \times 58 \times 380 \times 0,89}{1000} = 33,97 \text{ kWh} \quad (9)$$

Logo, a redução no consumo nessa modificação é a subtração de (8) com (9), obtendo assim o valor de 2,67 kWh. E usando (10), obtem-se:

$$245 \text{ dias} \times 15 \text{ hrs} \times 2,67 \text{ kW} \times 0,26 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} = \text{R\$}2.551,18 \quad (10)$$

O remanejamento efetuado resultou em uma economia direta de aproximadamente R\$ 2.551,18 ao ano.

10.3 Economia com o gerador

Outra consequência das implementações que geraram uma economia no consumo de energia elétrica, foi a economia no consumo de óleo diesel do gerador, isso porque o percentual menor de carregamento consome menos combustível. Anteriormente, o consumo era de 175 litros de óleo diesel a cada noite de utilização no horário de ponta. O consumo diminuiu para aproximadamente 145 litros por noite, e considerando média de 21 dias úteis mensais, e valor do óleo diesel R\$2,00 ao litro, essa diminuição do consumo de óleo diesel gerou uma economia direta de aproximadamente R\$1.260,00 por mês.

Com base nas implementações realizadas, a Tabela 08 mostra o ganho obtido com todas as implementações, considerando o tempo de análise de um ano.

Tabela 08: Resumo executivo das implementações realizadas.

| AÇÃO | ECONOMIA DE ENERGIA | INVESTIMENTO [R\$] | GASTOS EVITADOS [R\$] |
|------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Variação velocidade + damper | 91.066,5 [kWh/ano] | R\$36.665,70 | R\$24.132,62 |
| Remanejo de motores | 9.812,25 [kWh/ano] | - | R\$2.551,18 |
| TOTAL | 100.878 kWh/ano | R\$36.665,70 | R\$ 26.683,8 |

Fazendo-se um somatório dos gastos evitados, inclui-se a economia com óleo diesel (aproximadamente 6.125 litros/ano), o equivalente a R\$11.943,75, e chegando-se assim num valor de gastos evitados de R\$ 38.627,55.

A demanda contratada não foi diminuída devido à variação de processos dentro da fábrica, ou seja, a diminuição do consumo registrado nesses pontos foi suficiente para suprir a demanda de novas cargas em outros setores que aumentam de forma sazonal e bem dinâmica.

O efeito da inclusão de uma carga não-linear do porte do inversor de frequência de potência nominal de 75 cv, foi percebido em um equipamento que possui diversos servo-acionamentos e servomotores, que trabalha também em horário de ponta, onde a fonte de energia elétrica passa a ser o gerador. Os dispositivos de controle dos servomotores de uma máquina operatriz apresentavam alarme quando o exaustor (inversor de frequência) variava a velocidade durante o horário de funcionamento do gerador.

Para confirmar a influência do inversor nas anomalias de tensão detectadas pelos acionamentos, instalou-se um analisador de medidas elétricas na entrada do inversor de frequência, e posteriormente no QGBT. Nesta ocasião, fizeram-se testes simulando as possibilidades reais e registrando em que horário foram feitas, para depois comparar o efeito de cada ação com o resultado da medição:

- somente exaustor (inversor de 75 cv) ligado;
- somente máquina que sinalizava anomalia quando exaustor ligado, em horário de ponta;
- máquina e exaustor inoperantes;
- máquina e exaustor ligados;

Estas medições contemplaram períodos em que a fonte de energia era a concessionária e também horário de ponta, onde a fonte era o gerador. Um resultado parcial pode ser visto na Figura 16.

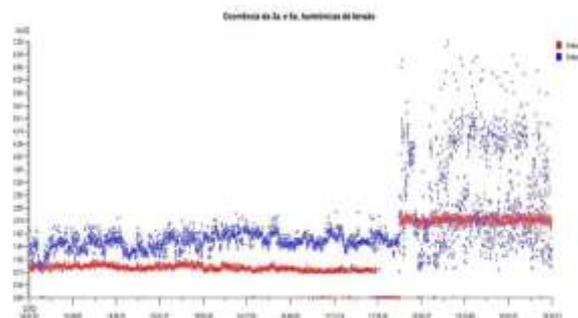


Figura 16: Resultados das medidas.

Constatou-se uma contribuição significativa do inversor de frequência nos distúrbios totais da rede elétrica interna da planta, que se refletem sobre um monitoramento que o software destes acionamentos de servomotores fazem na qualidade da energia. Por outro lado, esta máquina que possui esses acionamentos, servomotores, inversores de frequência, motores de 200 Hz, também contribui para a inclusão de tensões de diferentes frequências da fundamental (harmônicas 9). Iniciou-se então um estudo paralelo, para verificar a necessidade de implementação de filtros específicos para a tensão harmônica de maior contribuição no distúrbio, especificamente, a 5ª harmônica (filtro passivo) ou filtro com correção dinâmica (filtros ativos). Ainda a definir, se em ambas fontes (inversor de frequência do exaustor e máquina operatriz) ou de forma individual. Uma publicação direcionada ao assunto de qualidade de energia, [18] descreve circunstância semelhante:

[...] o filtro harmônico passivo LC é chamado de filtro não compensado, porém há, genericamente, um outro tipo de filtro passivo, chamado de filtro de harmônicas compensado, que é particularmente recomendado para instalações onde seja utilizada uma fonte de substituição de energia, como, por exemplo, grupos geradores.

A esse respeito, a fim de evitar ou limitar a intensidade de ruídos causados pela introdução das harmônicas na rede, seguindo recomendação do fabricante [9] de que “[...] entre 0 e 240 rpm o acionamento através da opção PM Sensorless apresenta ruído magnético de maior intensidade característico do método de controle”, a rotação mínima foi estabelecida em 300 rpm, ocasião em que os dutos principais das duas máquinas estão fechados. Essa teoria se comprova em outras medições efetuadas, onde em um período de amostragem percebeu-se que quanto menor é a velocidade imposta ao inversor de frequência, maior é a distorção de harmônica resultante. Nestas condições, ainda por trazer economia de energia elétrica considerável com uma rotação inferior (conforme diferenças apontadas entre os meses março e abril), uma rotação mínima deve ser estabelecida de modo a

não acumular particulado (pó e demais resíduos de MDF) no interior dos dutos.

Ressaltando os aspectos que envolvem perspectivas de continuidade do trabalho, sobre as ações de eficiência energética, é fundamental o conhecimento do processo passível de melhoria, não apenas em análises pontuais, mas sim através de estudos que aliem ações de eficiência a cada particularidade dos processos. No caso dos sistemas motrizes, é recomendável não atuar sobre os motores somente, mas também agir tirando proveito de situações do processo, como o realizado no estudo de caso apresentado.

O ciclo PDCA, programa de referência da Norma ISO 50.001, continuará sendo utilizado como base para sequência do estudo apresentado, que não pode ser dado como concluído, visto as demais cargas citadas ainda são passíveis de melhorias. A este propósito, segue um resumo executivo do ciclo PDCA:

- P: estudo das cargas, levantamento das possibilidades de redução dentre as hipóteses levantadas demonstrado no item “8.1 PLANEJAR”;
- D: execução das ações, demonstradas no item “9.1 IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE AÇÃO”;
- C: verificação dos resultados, demonstrados entre os itens “10.1 à 10.3 - RESULTADOS”;
- A: discussões, correção das etapas do ciclo, definição de novos limites e futuras implementações

11. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a combinação dos dampers automáticos e a variação de velocidade com motor de maior rendimento no sistema de exaustão foram considerados satisfatórios, visto a possibilidade do tempo de retorno de investimento ser menor do que o projetado inicialmente.

O tema eficiência energética é muito abrangente, e nesse trabalho os esforços foram concentrados nos resultados da implementação do motor de ímãs permanentes. Contudo, mesmo o assunto eficiência energética sendo desmembrado em sistemas de exaustão está longe de ser esgotado. Exemplo disso é a qualidade de energia, visto que levando em conta as demais linhas de exaustão existentes, a viabilidade de implementação de variação de velocidade, passa obrigatoriamente por estudo específico de qualidade de energia, com foco na inclusão de cargas não-lineares e por consequência o surgimento de harmônicas.

Convém, no entanto, ressaltar que os estudos que apontarem resultados dos tempos das demais linhas de exaustão em que estas poderiam permanecer inoperantes, já poderão definir de antemão a implementação de dampers, também automáticos, com baixo investimento e sem influência na qualidade de energia.

Ainda há de se ressaltar que quando se trata de eficiência ou mesmo a otimização, é imprescindível um trabalho de conscientização, pois há uma preocupação com os maiores consumidores. Contudo, um somatório de pequenos desperdícios também pode gerar um carregamento maior sobre as fontes de energia, sejam elas elétricas, a gás ou óleo diesel.

Como consequência indireta, a metodologia utilizada além de servir como base para execução da eficiência, privilegiou equipamentos de crucial importância para o funcionamento da fábrica, pois as verificações pontuais incidiram em cuidados específicos, influenciando assim no aumento da confiabilidade destes equipamentos. Esta metodologia continuará sendo usada na gestão de energia, possibilitando assim um acompanhamento com registros e implementações que caracterize um programa de melhoria contínua.

12. REFERÊNCIAS

- [1] EPE, 2011. Relatório anual Balanço Energético Nacional 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em: 26 de ago. 2012.
- [2] HADDAD, J. e outros. Eficiência Energética – Teoria e Prática - 1a ed. - Eletrobrás/PROCEL Educação. UNIFEI, 2007.
- [3] EPE, 2010. Relatório anual Balanço Energético Nacional 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em: 26 de jun. 2011.
- [4] WEG Equipamentos Elétricos S/A – Treinamentos/Módulo 6: Apostila de Eficiência Energética em Aplicação de Motores Elétricos. Jaraguá do Sul, 2006.
- [5] FITZGERALD, A.E. - Máquinas Elétricas / Charles Kingsley, Stephen D. Umans; tradução de Anatólio Laschuk. - 6a ed. - Porto Alegre: Editora Bookman, 2006.
- [6] DEL TORO, V. - Fundamentos de Máquinas Elétricas; tradução Onofre de Andrade Martins – 1a ed. - Rio Janeiro: Editora LTC, 1999.
- [7] GENERAL ELETRIC, 2010 – Notas Técnicas Motores NT-01. Disponível em: <http://www.geindustrial.com.br/downloads>. Acesso em: 15 set. 2011
- [8] INMETRO, 2011. Rendimentos nominais mínimos. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001643.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2011
- [9] WEG Equipamentos Elétricos S/A – Catálogo Wmagnet Drive System, Rev. 08, 05/2011.
- [10] WEG Equipamentos Elétricos S/A – Guia Rápido Wmagnet Drive System, 2012 - Ver: 00, 11//2011, código 50033441).
- [11] BARBI, I. – Eletrônica de Potência – 5a ed. – Florianópolis: Editora do Autor, 2005.
- [12] WEG Equipamentos Elétricos S/A – Guia Técnico Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência, 2009. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2012.
- [13] AMCA, 2011. *Air Moving and Control Association*. Disponível em: <http://www.amca.org/>. Acesso em: 07 jun. 2012
- [14] MOREIRA, A. B.- Análise da Operação de Sistemas de Ventilação Industrial – Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2006.
- [15] PROCEL, HVAC Handbook, 2006. – Conservação de Energia. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/25841679/HVAC-Handbook-PROCEL-Conservacao-de-Energia>. Acesso em: 30 ago. 2011.
- [16] VIANA, C. N. A., Manual de Eficiência Industrial – Módulo Ventiladores e Exaustores. ELETROBRÁS/PROCEL, Rio de Janeiro, 2002.
- [17] OTAM, Ventiladores Industriais – Boletim técnico No 2: Lei dos Ventiladores. Disponível em: http://www.otam.com.br/seguro_c_form_login.php. Acesso: 20 set. 2011
- [18] MORENO, H. Harmônicas nas Instalações Elétricas – PROCORE, São Paulo, 2001.