

Sistema de Ventilação numa Planta de Produção de Aço: Estudo de Caso no Contexto da Eficiência Energética

Francisco de Assis Dias* Hélder de Paula**
Caio Eduardo Silva* Marcelo Seixas Vieira***

* *Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPEL), Uberlândia, MG, (e-mails: eng.franciscodias@gmail.com, caioeduardo@ufsj.edu.br)*

** *Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Uberlândia, MG (e-mail: drhelderdepaula@gmail.com)*

*** *Aperam South America, (e-mail: marcelo.vieira@aperam.com)*

Abstract: Medium voltage electric motors that drive industrial fans are major consumers of electricity. The flow of this type of ventilation systems is usually controlled by damper valves on the suction side of the fans. With such control, even with reduced air flows, the electric motor demands power values close to the rated load situation. In this context, the aim of this work is the technical and financial feasibility analysis of replacing the control based on damper valves by frequency converters, in a Dedusting System of a steel-making industry, which use two medium-voltage induction motors of 1,4 MW (each). The investigation is made analysing the system characteristic curves, the comparison of both control methods using computational simulations and the calculation of the system power consumption with the new flow control method, in order to verify the payback of the investment.

Resumo: Os motores elétricos de média tensão que acionam ventiladores industriais são grandes consumidores de energia elétrica. A vazão deste tipo de sistema de ventilação é geralmente controlada por válvulas do tipo *damper*, alocadas no lado de sucção dos ventiladores. Nessas condições, ainda que com vazão reduzida no sistema, a demanda de energia por parte do motor é próxima ao valor associado ao seu carregamento nominal. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é a análise técnica e de viabilidade financeira para a substituição do controle por válvulas *damper* pelo controle da velocidade utilizando um conversor de frequência, em um sistema de despoeiramento de uma indústria siderúrgica, de forma a incrementar a eficiência energética do sistema, que possui dois motores de média tensão de 1,4 MW (cada). A investigação para a viabilidade da modificação de seu controle será feita através da análise das curvas características do sistema, da comparação dos dois métodos de controle através da simulação computacional do sistema e do cálculo do consumo de energia com o novo método de controle de vazão, de forma a se comprovar a redução do consumo de energia elétrica e o retorno do investimento a ser realizado.

Keywords: Electric Motors; Fans; *Dampers*; Energy Efficiency; Frequency Converter.

Palavras-chaves: Motores Elétricos; Ventiladores; Válvulas *Damper*; Eficiência Energética; Conversor de Frequência.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica vem crescendo consideravelmente nos últimos anos no Brasil (Papa and Assunção, 2016). Neste contexto, o uso eficiente da energia, em especial a elétrica, tem sido uma grande preocupação atual, devido à sua ligação direta com questões econômicas e ambientais (Garcia, 2003).

O Balanço Energético Nacional - BEN (MME, 2019) mostra que a indústria foi responsável por 36% de todo o consumo de energia elétrica no país. De acordo com este mesmo balanço, os motores elétricos destacam-se dentre

as cargas elétricas industriais e são os maiores agentes em termos de consumo de energia elétrica, correspondendo a mais de 60% do total de energia elétrica consumida neste setor (Figura 1), sendo responsáveis por 32% do consumo global (Garcia, 2003). Tal consumo se agrava ainda mais ao considerar que, em muitos casos, a aplicação/especificação de motores elétricos se encontra inadequada, com motores sobredimensionados, operando com carga abaixo da nominal, e portanto, com baixos fator de potência e rendimento (Belinovski, 2011).

Para se tornarem mais competitivas, além dos incentivos recebidos, as indústrias começaram a investir em políticas

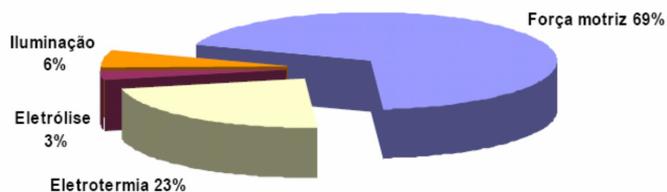


Figura 1. Distribuição do Consumo de Energia Elétrica no Setor Industrial Por Uso Final.

de eficiência energética e em um melhor gerenciamento do consumo de energia, com o objetivo de reduzir o desperdício, baratear os seus gastos e ganhar competitividade no mercado (Crisostomo and Benedito, 2018). Neste contexto, vale ressaltar que os maiores ativos no consumo de energia na indústria de processos são os sistemas de ventilação, compressão e bombeamento, alcançando cerca de 70% do consumo de motores elétricos nessas indústrias (Belinovski, 2011). Assim, estes sistemas têm sido apontados como alvos principais das ações que visam garantir a economia de energia elétrica (Blaabjerg et al., 2011).

No que tange aos sistemas de ventilação industrial, tem-se que os mesmos são amplamente utilizados em diversos processos. São empregados, por exemplo, para promoverem a circulação de ar condicionado (resfriado ou aquecido) para o conforto humano, para removerem ar contaminado de ambientes, para extraírem, com o auxílio de uma corrente de gás, particulado sólido gerado em processos industriais e para promoverem a filtragem de ar de ambientes críticos, além de inúmeras outras aplicações. (Fonseca et al., 2008)

Grande parte dos sistemas de ventilação são aplicações que requerem potência e conjugado variáveis, sendo necessário algum tipo de controle de vazão de ar. Na maioria dos casos, principalmente em sistemas mais antigos, são utilizados válvulas do tipo *dampers* para variar o fluxo de ar nos dutos do sistema. A substituição do controle de vazão do tipo *dampers* para controladores de velocidade dos motores, tais como os conversores de frequência nesse tipo de planta, é uma das melhores soluções para otimizar o consumo de energia elétrica do sistema (Papa and Assunção, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnico-econômica para a avaliação da viabilidade de substituição do controle feito via *dampers* por conversores de frequência, de forma a reduzir o consumo de energia elétrica de um sistema de despoeiramento de uma indústria do setor siderúrgico, que emprega dois motores de indução de média tensão e potência nominal de 1,4 MW (cada). A investigação feita utilizou dados de medições obtidas em campo e também simulações computacionais desenvolvidas especificamente para este fim, sendo os resultados obtidos no presente estudo elementos importantes para a tomada de decisão por parte da empresa na aquisição ou não do novo sistema, em função do retorno de investimento esperado.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

No processo de fusão dos diversos tipos de aços ocorre um volume elevado de partículas em suspensão, sendo necessário um sistema de despoeiramento robusto para fazer a captação, o armazenamento e a tiragem do pó.

Sendo assim, a principal função do sistema de despoeiramento é retirar todas as partículas em suspensão que são emitidas no processo de fusão dos diversos tipos de aço no convertedor. Essas partículas são retiradas no filtro de manga para que não sejam emitidas para atmosfera. Desta forma é cumprida a determinação ambiental, vigente, para a emissão de partículas no processo siderúrgico (Cavaliere et al., 2018).

O sistema de despoeiramento em questão funciona em regime de 24 horas/dia, possui 12 compartimentos com 2304 mangas filtrantes. Os principais componentes deste sistema de despoeiramento são: *dampers*, Coifas de Carregamento, Câmara de Pré-Coleta, Sistema de Dutos Secundários e Combinados, Exaustores ou Ventiladores, Motores de indução trifásicos e Filtro de mangas. A Figura 2 apresenta uma visão parcial da instalação dos ventiladores e motores.



Figura 2. Ventiladores do Sistema de Despoeiramento

Para succionar os particulados para as mangas, o sistema de despoeiramento possui dois motores de indução trifásicos com tensão nominal de 2,4 kV, corrente nominal 416A e potência nominal de 1400 kW. Tais motores não possuem controle de potência, o tipo de partida é direto através de disjuntores. As correntes de partidas são da ordem de cinco a seis vezes a corrente nominal, trazendo desta forma dificuldades para a partida desses motores com todo o processo produtivo em funcionamento.

O controle de fluxo necessário para retirada de particulados é realizado através de conjunto de *dampers*, que são variadores mecânicos para ajustes ao processo produtivo. Há grandes limitações para redução das potências dos mesmos em períodos de baixa utilização do sistema de exaustão. Toda a adequação do fluxo de ar é controlada através dos *dampers* existentes.

No processamento de uma corrida existem várias fases com presença maior ou menor de partículas, o que exigiria menor ou maior velocidade do motor. No entanto devido às condições descritas acima, o motor funcionava sempre na velocidade nominal (60 Hz).

As características técnicas do Ventilador e dos Motores de Indução são apresentadas na Tabela 1

Tabela 1. Características técnicas do ventilador e dos motores do sistema de ventilação

| Características do Ventilador | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Tipo | Centrífugo |
| Damper | Inlet (na Admissão) |
| Rotação Nominal (rpm) | 855 |
| Vazão Máxima (Nm ³ /h) | 395.000 |
| Característica dos Motores | |
| Potência (kW) | 1400 |
| Tensão (V) | 2.400 |
| Corrente (A) | 416 |
| Fator de Potência | 0,85 |
| Rendimento (%) | 95,2 |
| Velocidade Nominal (rpm) | 855 |

Os parâmetros do circuito equivalente dos motores de indução são apresentados na Tabela 2 e foram fornecidos pelo fabricante destes motores e confirmados através de simulação computacional para estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos.

Tabela 2. Parâmetros do Circuito Equivalente dos Motores de Indução Trifásicos

| Parâmetro | Valor (mΩ) |
|---|------------|
| Resistência do enrolamento do estator (R_s) | 36 |
| Resistência das barras do rotor (R_r) | 26 |
| Reatância de dispersão do estator (X_s) | 368 |
| Reatância de dispersão do rotor (X_r) | 250 |
| Reatância de magnetização (X_m) | 9.736 |

3. METODOLOGIA

3.1 Leis de Semelhança dos Ventiladores

Conhecidas as condições de funcionamento de um ventilador, podem ser aplicadas as leis de semelhança para determinar valores de diversas grandezas quando uma ou mais é modificada em um ventilador semelhante. Tais leis são dadas pelas seguintes relações (Macintyre, 1990; Kocak and Durmusoglu, 2018):

Para um dado rotor, operando com o mesmo fluido, a vazão volumétrica Q é diretamente proporcional a rotação ω , a altura manométrica (H) é proporcional ao quadrado de ω , e a potência mecânica no eixo (P_{mec}) é proporcional ao cubo de ω . Assim:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_{mec 1}}{P_{mec 2}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \quad (3)$$

3.2 Perfil de Consumo de Energia e Considerações sobre a Instalação

Inicialmente foram levantados os perfis de consumo de energia elétrica e quantidades de horas em cada uma das

Tabela 3. Perfil de Consumo e Quantidade de horas em cada fase do processo

| Fases do Processo | Horas /ano | (%) | Cons. de Energia (kW) 1 Motor | Consumo de Energia Anual (MWh) 2 Motores |
|-------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|--|
| 1 Carregamento | 248 | 2,94 | 1.237 | 613,55 |
| 2 Sopros | 2.234 | 26,50 | 1.110 | 4.959,48 |
| 3 Amostragem | 1.170 | 13,87 | 1.181 | 2.763,54 |
| 5 Ressorpro | 187 | 2,21 | 1.103 | 412,52 |
| 6 Vazamento | 887 | 10,52 | 1.199 | 2.127,02 |
| 7 Splashing | 186 | 2,21 | 1.214 | 451,60 |
| 8 Tempo entre Carregamento / Sopros | 187 | 2,21 | 1.190 | 445,06 |
| 9 Ociosidade | 3.333 | 39,53 | 1.217 | 8.112,52 |
| Total | 8.432 | 100,00 | 9.451 | 19.885,29 |

fases do processo através de medições reais de potência consumida pelos motores elétricos dos ventiladores. Tal resultado é apresentado na tabela 3.

Diante deste estudo, foram levantados alguns pontos importantes para a análise:

- Foi verificado que os posicionamentos dos *dampers* para as fases apontadas na Tabela 3 foram praticados durante muitos anos devido à dificuldades mecânicas no acionamento destes dispositivos, que se quebravam com muita frequência. Tais posicionamentos foram determinados, de forma a atender à fase mais crítica (sopro) com posicionamento de 50%, e as demais fases ficavam mantidas em 35%. Entretanto, isso foi feito sem levar em consideração a real demanda de vazão de ar nessas etapas, ocasionando um sistema superdimensionado na maior parte do tempo;
- Como pode-se verificar, a ociosidade do sistema contabilizava grande parcela do tempo, já que o processo do despoejamento não é contínuo e possui períodos sem funcionamento entre as fases, ou entre ciclos de operação;
- Como os motores elétricos dos ventiladores eram acionados através de partida direta, depois de um desligamento, os mesmos só podiam ser ligados novamente depois de 1 hora (tempo necessário para normalização da temperatura de estator para uma nova partida). Além disso, devido às altas correntes de partida (em torno de 6 vezes a corrente nominal), tal procedimento demandava um alto planejamento, parada do processo e até mesmo desligamento temporário de outras unidades da usina, o que tornava essa ação quase impraticável;

Devido aos motivos citados nos itens anteriores, os motores elétricos consumiam uma enorme quantidade de energia desnecessária, funcionando com velocidade constante durante todo o período e operando na maior parte do tempo com um controle de vazão superdimensionado e ineficiente.

Diante disso, foi realizado um estudo técnico juntamente com a equipe de engenharia e de operação da empresa para determinar os níveis de vazão que seriam realmente demandados em cada etapa do ciclo de operação, levando em conta os níveis de particulados suspensos no ar, pressão, temperatura, O_2 e CO_2 para que o processo de despo-

Tabela 4. Novos Valores de Vazão para Fases do Processo

| Fases do Processo | | Vazão (Nm ³ /h) | Frequência (Hz) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | Carregamento | 164.583 | 25 |
| 2 | Sopro | 309.416 | 47 |
| 3 | Amostragem | 164.583 | 25 |
| 5 | Ressopro | 230.416 | 35 |
| 6 | Vazamento | 197.500 | 30 |
| 7 | Splashing | 197.500 | 30 |
| 8 | Tempo entre Carregamento / Sopro | 131.666 | 20 |
| 9 | Ociosidade | 131.666 | 20 |

eiramento pudesse funcionar de forma segura e otimizada, sem perder rendimento e qualidade na operação. Os novos valores de vazão são apresentados na Tabela 4. Tal estudo será de grande importância para a determinação das velocidades de operação dos ventiladores, com o novo sistema de acionamento com velocidade variável dos motores, que será proposto a seguir. Os valores de frequência de rotação apresentados nessa tabela foram calculados a partir da equação 1 da Lei de Semelhança dos Ventiladores.

3.3 Curva Característica dos Ventiladores e da Instalação

Estudar a interdependência entre as grandezas características dos ventiladores baseando-se em considerações puramente teóricas é muito difícil. Em vista disso, recorre-se a ensaios, que permitem expressar a variação de uma grandeza em função da outra, em forma de gráficos, possibilitando uma análise de seu comportamento em função das variações nas grandezas representadas (Silva Júnior, 2004).

As curvas características dos ventiladores ilustram o comportamento de grandezas como a potência elétrica, rendimento do ventilador e pressão, com relação à vazão volumétrica, além de mostrar a curva característica da instalação (Belinovski, 2011).

Uma das formas de analisar o potencial de redução de consumo energético em ventiladores, é através de suas curvas características. Para este caso em estudo, foi utilizada a curva característica do sistema de ventiladores fornecida pelo fabricante, que é reproduzida na Figura 3. Nesta curva são apresentadas as diversas variações de comportamento Potência x Vazão ou Carga (Pressão) x Vazão para diferentes aberturas do *damper*. A curva em verde representa a curva do sistema. A carga se refere à pressão, dada na unidade de nnCE.

Em uma primeira análise, foi obtida a curva de Potência para o controle de vazão com *damper* do tipo *inlet* (Figura 3, ligando-se os pontos de cruzamento entre a curva do ventilador para diferentes aberturas e a curva da instalação com as curvas de potência, para a mesma vazão. Esta curva obtida descreve a variação de potência no eixo do motor para diferentes carregamentos ou posições do *damper*.

Em um segundo momento, com o objetivo de avaliar o potencial de redução no consumo de energia com a utilização de controle de vazão por inversores de frequência, foram traçadas novas curvas para diferentes rotações (ou frequências), como pode ser visto na Figura 4.

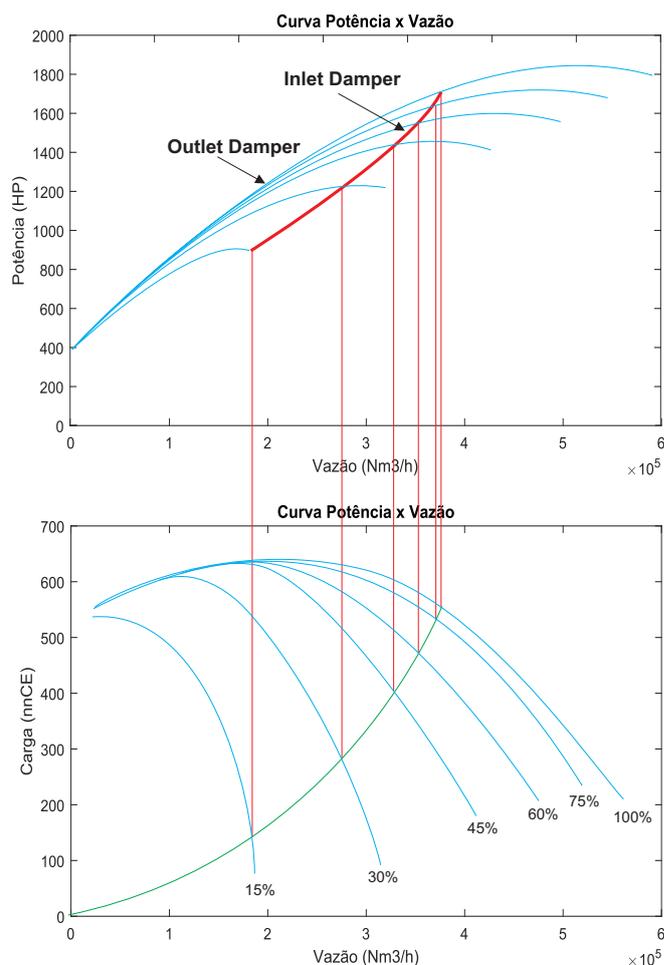


Figura 3. Curva Característica do Sistema de Ventilação - Determinação da Curva de Potência com *Damper* na Admissão (*Inlet Damper*)

Para o ajuste das curvas características utilizou-se polinômios que foram obtidos no Matlab, através da função *polyfit* que calcula uma interpolação polinomial de ordem *n* usando a técnica dos mínimos quadrados. A função *polyfit* calcula os coeficientes do polinômio interpolador.

As novas curvas foram facilmente calculadas utilizando-se as relações das Leis de Semelhança dos Ventiladores, apresentadas anteriormente. Em seguida, a curva de potência para utilização do inversor de frequência foi obtida ligando-se também os pontos de cruzamento entre as curvas do gráfico de Carga *versus* Vazão, com as curvas do gráfico de Potência *versus* Vazão. Na Figura 4 foi adicionada também a curva de potência para operação com o *damper inlet*, obtida anteriormente. Dessa forma, foi possível comparar visualmente a diferença de consumo energético para os diferentes métodos de controle de vazão. Pode-se concluir que a utilização do inversor de frequência pode contribuir potencialmente para a redução do consumo de energia.

3.4 Simulação Computacional

Com o objetivo de se ter uma análise mais aprofundada e exata a respeito da viabilidade técnica e financeira da implementação do sistema com o inversor de frequência operando com as rotações propostas na Tabela 4, foi desenvolvida uma modelagem do sistema no ambiente

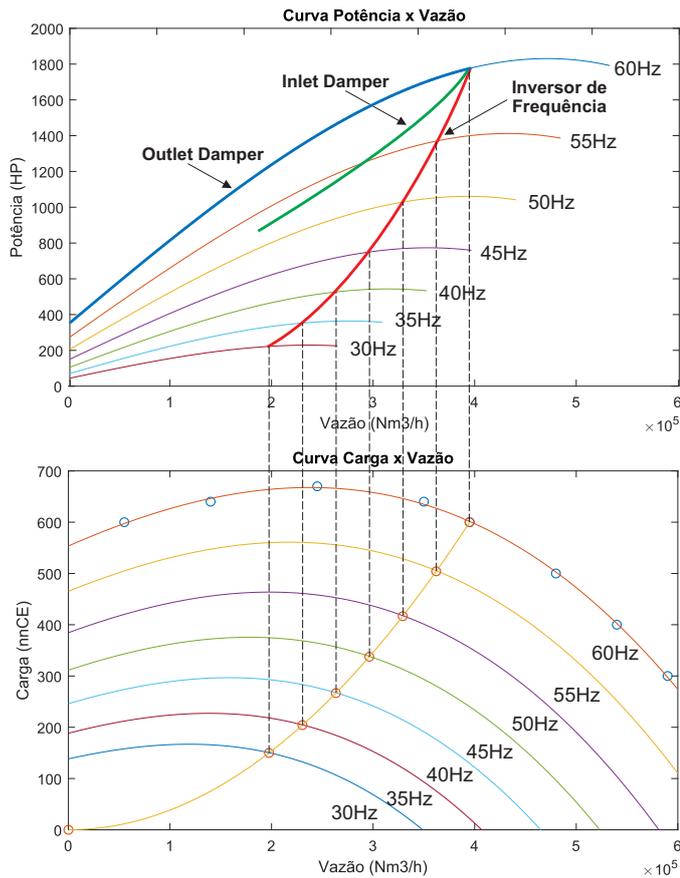


Figura 4. Curva Característica do Sistema de Ventilação - Determinação da Curva de Potência com Inversor de Frequência.

Simulink/Matlab para representar de forma mais real o acionamento do motor elétrico com o inversor operando no modo de “Controle Escalar”, ou “Controle V/F”, conforme pode ser visto na Figura 5.

Para a obtenção do conjugado de carga necessário para a simulação do motor elétrico, foi utilizado a metodologia para estimção de torque proposta por Lacerda et al. (2016) e Baccarini et al. (2018). O método apresenta erros menores do que 2% e é baseado nos valores RMS dos sinais de corrente, tensão e potência, que são facilmente coletados em um ambiente industrial. Utilizou-se então as medições históricas dessas grandezas obtidas através do sistema supervisorio da empresa para obter um estimador de torque para a simulação.

Além disso, optou-se também por realizar uma segunda simulação para obter valores de potência elétrica consumida nas fases do processo, para as diferentes frequências propostas na Tabela 4, utilizando-se as relações de potência da Lei de Semelhança dos Ventiladores (Equação 3) a partir de uma série temporal de medições de potência elétrica realizadas durante um ciclo de operação, com *dampner* 100% aberto e com frequência de 60Hz. Os resultados das duas simulações são apresentados na Figura 6. A curva em verde representa a simulação realizada no *Simulink/Matlab*, conforme Figura 5, e a curva em vermelho representa o cálculo da velocidade variável utilizando a Lei de Semelhança dos Ventiladores, conforme mencionado acima.

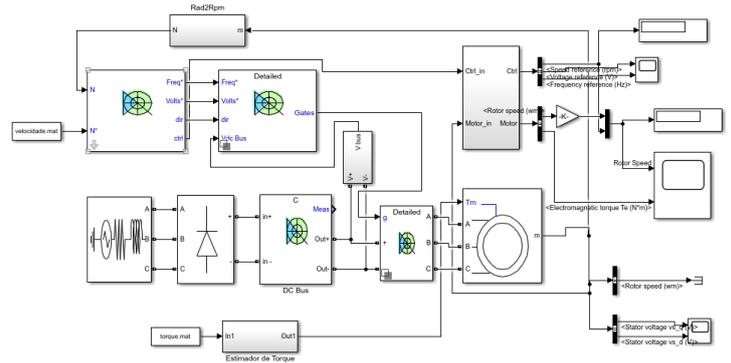


Figura 5. Simulação Computacional do Sistema de Controle de Velocidade por Inversor de Frequência

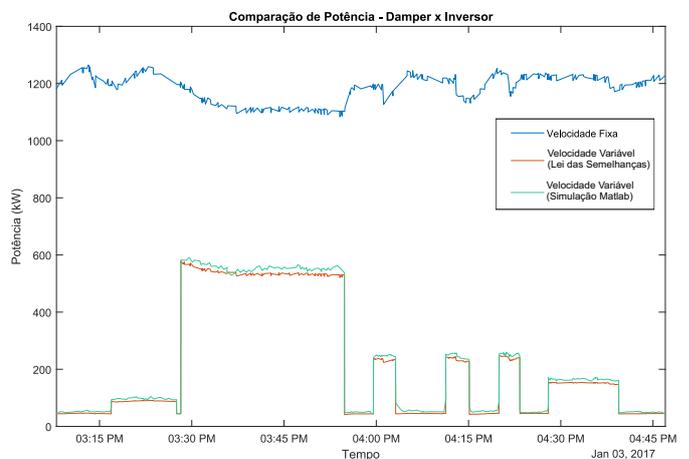


Figura 6. Comparação de consumo de energia com *dampner* e Inversor de Frequência, durante um ciclo de operação

4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir das simulações realizadas, e baseando-se na Lei de Semelhança dos Ventiladores, foi possível calcular o consumo de Energia Elétrica anual para os dois motores do Sistema de Ventilação do Despoeiramento, considerando a quantidade de horas computadas e apresentadas na Tabela 1, e tomando como base a tarifa média de energia de R\$ 0,25 /kWh vigente na época deste estudo (2017). Os resultados são apresentados na Tabela 5. Como pode-se observar, a redução de consumo de energia elétrica com a utilização do inversor de frequência é de 82%. A Figura 7 apresenta de forma resumida a quantidade de energia gasta com os dois métodos e a economia de energia possível de ser obtida com o método de controle de velocidade com o inversor de frequência. A Tabela 6 apresenta uma análise financeira, com tempo de retorno do investimento de 1,02 anos.

Diante de todo este estudo realizado, a proposta foi aprovada e implementada pela indústria em questão. Foi então construída uma sala elétrica para abrigar o inversor de frequência, que passou a acionar os motores dos ventiladores, com controle de velocidade automatizado, seguindo as frequências de rotação propostas na Tabela 4.

Tabela 5. Consumo de Energia Elétrica para os dois métodos de Controle de Vazão

| Fases | Consumo de Energia Anual (MWh) 2 Motores c/ Damper | Consumo de Energia Anual (MWh) 2 Motores c/ Inversor | Consumo de Energia Anual (R\$) 2 Motores c/ Damper | Consumo de Energia Anual (R\$) 2 Motores c/ Inversor |
|--------------|--|--|--|--|
| 1 | 613,55 | 45,08 | 153.387,50 | 11.270,00 |
| 2 | 4.959,48 | 2.399,3 | 1.239.870,00 | 599.825,00 |
| 3 | 2.763,54 | 212,73 | 690.885,00 | 53.182,50 |
| 5 | 412,52 | 86,4 | 103.130,00 | 21.600,00 |
| 6 | 2.127,02 | 269,7 | 531.775,00 | 69.425,00 |
| 7 | 451,60 | 56,62 | 112.900,00 | 14.155,00 |
| 8 | 445,06 | 16,77 | 111.265,00 | 4.192,50 |
| 9 | 8.112,52 | 298,84 | 2.028.130,00 | 74.710,00 |
| Total | 19.885,29 | 3.385,44 | 4.971.322,50 | 846.360,00 |
| | Economia: 16.469,85 MWh/ano | | Economia: R\$ 4.124.972,50/ano | |

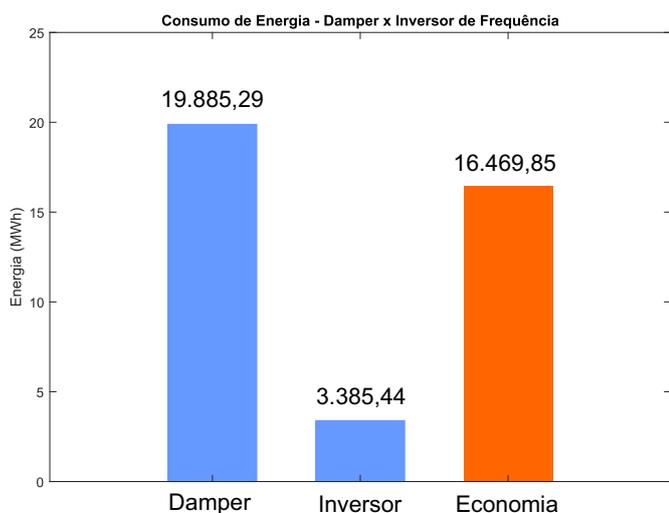


Figura 7. Comparação de consumo anual de energia com Damper e Inversor de Frequência

Tabela 6. Análise de Retorno do Investimento

| | |
|--|--------------|
| Total do investimento (R\$) | 4.225.855,00 |
| Taxa (%) ao ano | 12 |
| Tempo de retorno de investimento (anos) | 1,02 |

Depois de algum tempo foi possível comprovar o resultado real de redução de consumo de energia elétrica, através de medições realizadas em um período anterior à instalação do inversor, comparando com outro período posterior à instalação. Tal resultado é apresentado na Figura 8, onde pode-se verificar uma economia de cerca de 80% comparado ao período anterior, comprovando assim as estimativas calculadas anteriormente.

Além disso, como consequência, observou-se uma redução drástica nos níveis de vibração dos mancais dos motores elétricos, conforme pode-se verificar na Figura 9; cabe ressaltar que, conforme relato do setor de engenharia e manutenção da indústria, os (elevados) níveis de até então provocavam constantes problemas de manutenção mecânica nos motores.

5. CONCLUSÕES

Como esperado, o controle de vazão por meio da variação da velocidade de rotação do motor proporciona uma redução acentuada na potência ativa consumida pelo motor, o que foi comprovado com os resultados da avaliação

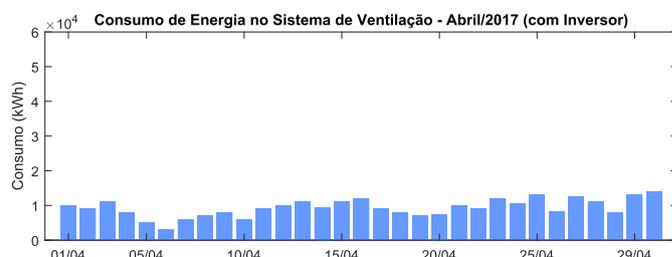
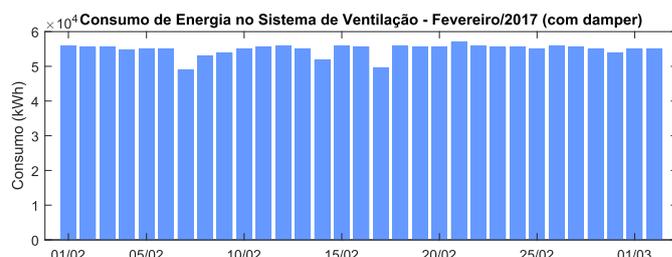


Figura 8. Consumo de energia diário do Sistema de Ventilação (a) com Damper e (b) com Inversor de Frequência

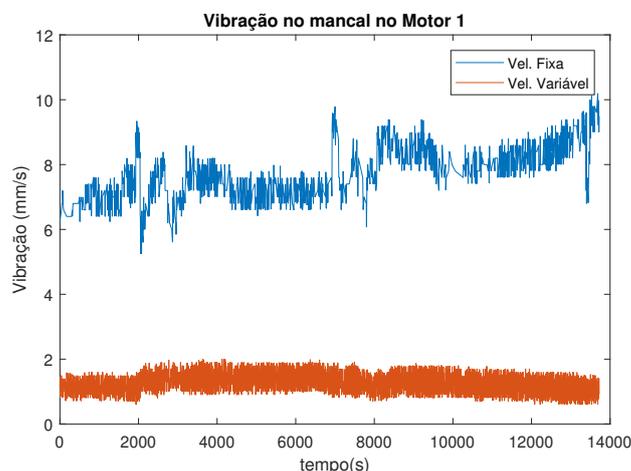


Figura 9. Comparação de valores medidos (antes e depois) de vibração no mancal de um dos motores

apresentada neste trabalho, que revelaram uma redução de 82% dos custos operacionais do sistema com a aplicação do método de controle de vazão por variação de velocidade. Além do controle por velocidade de rotação ser adequado em todas as rotações, há ainda a redução dos impactos negativos de partida e parada causados pela ligação direta dos motores à rede elétrica.

A partir do estudo realizado foi possível obter dados para substanciar a decisão de custo financeiro para a implementação da solução proposta. Além disso, foi possível ainda comprovar, por medições reais, a redução de energia elétrica esperada após a instalação do conversor de Frequência. O sistema de exaustão de materiais particulados do despoejamento se comportou de forma satisfatória e adequada com os novos padrões de vazão estabelecidos.

Além de todo o ganho de economia de energia elétrica proporcionado pelo novo sistema, pode-se citar outros benefícios também provenientes de sua implantação:

- Redução da corrente de partida dos motores, com partida suave em “rampa”, proporcionada pelo conversor;

- Flexibilidade para ligar e desligar os motores quando for necessário; com o sistema anterior, tal ação demandava um enorme planejamento e parada de produção;
- Flexibilidade para automatizar ou modificar manualmente a velocidade dos motores, via sistema supervi-sório;

Silva Júnior, A.N.d. (2004). *Eficiência Energética em Sistemas de Aeração de Silos de Armazenagem de Grãos, utilizando inversores de frequência*. Tese de Doutorado, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, ao CNPQ e à CAPES.

REFERÊNCIAS

- Baccarini, L.M.R., Amaral, G.F.V., and M., L.G.A. (2018). Simple robust estimation of load torque in induction machines for application in real plants. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9-12), 2695–2704. doi:10.1007/s00170-018-2662-x.
- Belinovski, K.D. (2011). *Uma Contribuição ao Estudo de Eficiência Energética em Sistemas Industriais de Ventilação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.
- Blaabjerg, F., Iov, F., Kerekes, T., Teodorescu, R., and Ma, K. (2011). Power electronics - key technology for renewable energy systems. In *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 445–466. IEEE, Tehran. doi:10.1109/PEDSTC.2011.5742462. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/5742462/>.
- Cavaliere, E.S., Cruz, C.A., Silva, H.A.d., Loss, H.B., Ribeiro, L.A., Miranda, L.L., and Viera, M.S. (2018). Inversor de Frequência no Sistema de Exaustão dos Ventiladores do Mrpl da Aperam South America – Planta de Timóteo. In *ABM Proceedings*, 124–124. Editora Blucher, São Paulo. doi:10.5151/2594-3626-31646.
- Crisostomo, B.L.L. and Benedito, L. (2018). Eficiência Energética Em Uma Planta Industrial de Louças Sanitárias: Estudo de Caso. João Pessoa, Paraíba, Brasil. doi:10.20906/CPS/CBA2018-0201.
- Fonseca, A.G., Martins, A.d.A., Batalhone, C.d.M., Bispo, D., and Delaiba, A.C. (2008). Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ventilação Industrial. volume v. 01. Uberlandia-MG.
- Garcia, A.G.P. (2003). *Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Kocak, G. and Durmusoglu, Y. (2018). Energy efficiency analysis of a ship’s central cooling system using variable speed pump. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 17(1), 43–51. doi:10.1080/20464177.2017.1283192.
- Lacerda, G.A.M., Baccarini, L.M.R., and Amaral, G.F.V. (2016). Método para a Obtenção de Torque de Motores de Indução Trifásicos de Fácil Aplicação Industrial. 6.
- Macintyre, A.J. (1990). *Ventilação Industrial e Controle da Poluição*. Guanabara, 2ª edição edition.
- MME (2019). Balanço Energético Nacional - ano base 2018 (BEN 2019).
- Papa, G.O. and Assunção, T. (2016). Eficiência Energética Com a Substituição do Método de Controle de ar em Caldeiras. 6.