

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM A SUBSTITUIÇÃO DO MÉTODO DE CONTROLE DE AR EM CALDEIRAS

GABRIEL O. PAPA

*Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Mestrado em Engenharia de Produção,
Campus Santa Bárbara d'Oeste
gepapa@unimep.br*

TERESA C. B. N. ASSUNÇÃO

*DEPEL, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei
Praça Frei Orlando 170, Sala 4.21 EL, 36307-352, São João del Rei, Minas Gerais.
bessa@ufsj.edu.br*

Abstract— Medium voltage induction motors which drive the fans of an airflow system to combustion in a steam generation plant are major consumers of electric energy. In these industrial plants, the power demand during small loading of the motors is fairly close to nominal demand. The airflow control made by dampers is located on the suction side of the fans. The propose of this paper is to change the control method by dampers to adjustable frequency drivers providing energetic efficiency on airflow production. All the relevant parameters of the system will be measured to verify the load variation on industrial plant and to justify the change in the control of the airflow system. To analyze the airflow and power demand variation on steam system is used a statistical correlation and regression. This statistics tools allow the comparison between nowadays-electric energy consumption and the future consumption of the system operating with adjustable frequency.

Keywords— Medium Voltage Induction Motors; Fans; Airflow System; Dampers; Adjustable Frequency; Energetic Efficiency.

Resumo— Motores elétricos de média tensão que acionam os ventiladores do sistema de ar para combustão em uma planta geradora de vapor são grandes consumidores de energia elétrica. A vazão do sistema de ar é controlada por válvulas *damper* no lado de sucção dos ventiladores. Nessas condições, o motor elétrico mesmo subcarregado, necessita de potência ativa próxima da demanda para carregamento nominal. O principal foco deste trabalho é a substituição do controle por válvulas *damper* pelo controle da velocidade, proporcionando eficiência energética com a redução do consumo de energia elétrica na produção de ar para combustão. A justificativa para a instalação do novo controle será feita através das medições dos parâmetros do sistema de ar com variação de carga para a geração de vapor da planta nos limites atuais de operação. As ferramentas estatísticas de correlação de variáveis e a regressão linear são os parâmetros empregados para definir a demanda de potência do sistema de ar em todas as faixas de variação de carga da planta geradora de vapor d'água. Então, é calculado o consumo atual de energia elétrica do sistema com o novo método de controle de vazão de ar, comprovando a redução de energia elétrica comparando os dois métodos de controle.

Palavras-chave— Motores Elétricos; Ventiladores; Sistema de Ar para Combustão; Energia Elétrica; Válvulas Damper; Controle de Velocidade; Eficiência Energética.

1 Introdução

A crise no cenário energético nacional, provocada principalmente pela escassez dos recursos hídricos, principal fonte dos parques geradores de energia elétrica do Brasil, tem refletido no custo da eletricidade ao consumidor final (ANEEL, 2015).

Paralelo aos custos elevados, a indústria de base enfrenta uma séria recessão, e tem produzido menos do que a sua capacidade nominal.

Uma alternativa para assegurar a competitividade das indústrias no mercado é buscar alterações nos processos de fabricação ou na eficiência de equipamentos para economia de energia elétrica.

No caso das plantas industriais geradoras de vapor d'água, o consumo de energia elétrica é consideravelmente elevado, com custos onerosos, que são agregados ao longo de toda a cadeia produtiva.

Além disso, os ativos de maior impacto no consumo de energia elétrica na indústria de processos são ventiladores e bombas, portanto, são

os maiores alvos de ações que visam eficiência energética (Steimer, 2008).

A substituição do controle de vazão de ar para combustão das caldeiras de válvulas tipo *damper* para controladores de velocidade nesse tipo de planta, é a solução para os dois problemas levantados, ou seja, proporciona o ajuste do consumo de energia elétrica dos motores que acionam os ventiladores de tiragem, e o das faixas reais de carregamento de geração de vapor.

O objetivo do artigo é apresentar a viabilidade de substituição apenas do método de controle da vazão de ar para obter maior eficiência energética em sistemas geradores de vapor com carregamento ocioso.

2 Sistema Gerador de Vapor

Plantas de geração de vapor apresentam características construtivas robustas e complexas. Em aplicações de cargas elevadas, o sistema de geração de vapor é feito de acordo com o processo

de fabricação, como é o caso de caldeiras de grande porte. Quando há manutenção e inspeção constante dos equipamentos principais, ou seja, da caldeira e periféricos, essas plantas operam por décadas, apenas com modificações relacionadas a características de atualizações de processo, substituição de equipamentos periféricos e eficiência do sistema gerador de energia térmica, permanecendo inalteradas as suas principais características construtivas.

A planta geradora de vapor apresentada neste trabalho é composta por uma caldeira aquatubular, onde os gases da combustão são confinados na câmara de combustão, e a água circula por uma parede de tubos d'água, como apresentado na Figura 1 (Shields, 1978).

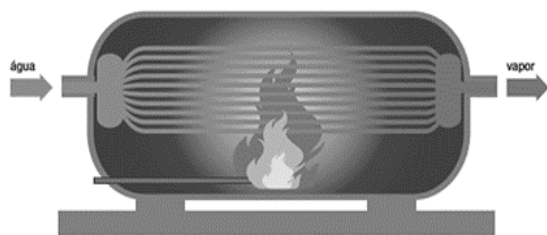


Figura 1. Caldeira Aquatubular (Elektro Eletricidade e Serviços S.A, 2014).

O sistema de ar para combustão é composto por dois ventiladores de tiragem, controlados por dois dampers (Damper 1 e Damper 2) e acionados por dois motores de indução trifásicos (MIT1 e MIT2), conforme a Figura 2.

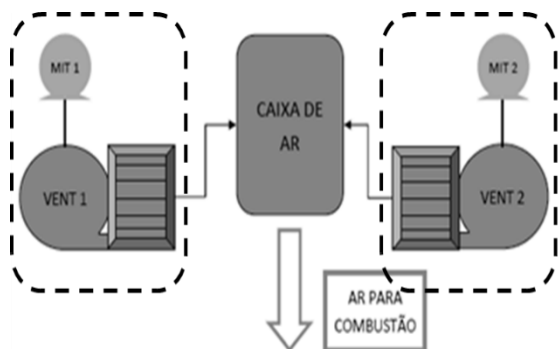


Figura 2. Sistema de ar para combustão.

Os destaques pontilhados na Figura 2 indicam onde são feitas as substituições efetivas dos métodos de controle. O sistema é espelhado, ou seja, os equipamentos possuem as mesmas características construtivas e foram instalados simultaneamente. Conclui-se então que, o rendimento de ambos é particularmente igual ao longo dos anos, pois são submetidos à mesma atmosfera e ao mesmo regime de operação.

As principais características dos elementos de interesse no sistema de combustão são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do sistema de combustão.

Produção de vapor	123,5 ton/h
Caixa de ar	
Vazão de ar máxima	36 m ³ /s
Pressão de descarga	2297,4 N/m ²
Ventilador	
Tipo	Centrífugo
Damper	Radial
Rotação nominal	1785 rpm
Vazão de ar máxima	18 m ³ /s
Motor elétrico	
Tensão	3,8 kV
Frequência	60 Hz
Potência Nominal	224 kW
Rotação Nominal	1800 rpm
Rendimento	89 %

3 Histograma de Operação

O levantamento das horas de geração de vapor em cada faixa de carregamento de ar para combustão é um indicador da viabilidade para a substituição do controle de vazão. Muitas vezes, indicando que para grandes carregamentos, o sistema é ocioso.

Na Figura 3 é mostrado que a planta industrial opera na maior parte do tempo, ao longo de um ano, nas faixas de 50% e 60% do carregamento máximo instalado.

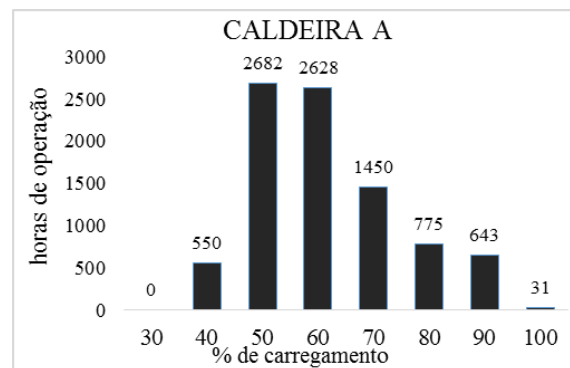


Figura 3. Carregamento de ar do sistema de vapor.

Na Figura 3 ainda é possível analisar que em apenas 0,35% do ano, a planta demandou a produção máxima de ar para a combustão do sistema gerador de vapor. Indicando preliminarmente que, a substituição do método de controle do fluxo de ar é viável. Em 99,65% do tempo, a demanda do sistema de vapor para combustão está abaixo do carregamento máximo instalado, ou seja, consumindo potência elétrica acima do necessário para suprir o processo.

4 Base Teórica de Cálculo

Os cálculos para comprovação da economia de energia elétrica na substituição dos métodos de

controle são baseados em duas das três leis de afinidade dos ventiladores.

Em (1) tem-se que, a variação da vazão de ar é linear à rotação do ventilador (Carlson, 2000).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Sendo Q_1 a faixa de produção de ar para combustão em m^3/s , Q_2 a vazão de ar para o carregamento máximo igual a $36 m^3/s$, N_2 a rotação nominal do motor em rpm e N_1 a rotação necessária em cada faixa de variação de vazão em rpm.

A demanda de potência no eixo do ventilador varia com o cubo da rotação, segundo (2) (Carlson, 2000).

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2)$$

Sendo BHP_2 a potência requerida no eixo do ventilador com carregamento máximo e BHP_1 a potência requerida no eixo do ventilador em cada faixa do carregamento.

A demanda de potência requerida no eixo do ventilador ou potência de freio pode ser calculada em função do diferencial de pressão e do rendimento do sistema, quando a altura manométrica entre o lado de sucção e descarga do ventilador é aproximadamente igual, e calculada por (3).

$$BHP = \frac{\Delta H}{\eta} \quad (3)$$

Em (3) ΔH é a pressão de descarga do ventilador medido em N/m^2 e η o rendimento energético do sistema de ar para combustão em %.

No entanto, a principal justificativa para a substituição do método de controle de ar, é a economia de energia elétrica medida pela demanda de potência elétrica dos motores que acionam os ventiladores.

O sistema de ar, motores elétricos, ventiladores, acoplamentos e tubulações permanecem inalterados, ou seja, apenas o elemento de controle de rotação será substituído. Dessa maneira, a redução da demanda de potência elétrica dos motores é a informação mais importante e impactante na justificativa de economia de energia elétrica.

A demanda de potência é calculada por (4).

$$P_{ATIVA} = \sqrt{3} \times V_l \times I_l \times \cos \varphi \quad (4)$$

Sendo V_l a tensão de alimentação dos motores, I_l a corrente medida no motor em Ampères e $\cos \varphi$ o fator de potência de operação do motor.

Então, a potência no eixo do ventilador, segundo (5), é calculada em função das medidas de vazão, pressão e potência ativa.

$$P_{EIXO} = \frac{Q \times P}{P_{ATIVA}} \quad (5)$$

Sendo Q e P a vazão de ar e pressão na caixa de ar medidas no teste de variação de carregamento do sistema, respectivamente, em m^3/s e N/m^2 .

Para determinação do rendimento do sistema de ventilação é utilizada a relação entre a demanda de potência no eixo do ventilador e a potência ativa medida no motor elétrico, de acordo com (6).

$$\eta_{SISTEMA} = \frac{P_{EIXO}}{P_{ATIVA}} \times 100 \quad (6)$$

5 Teste de Variação de Carregamento

Os parâmetros para a determinação do consumo de energia elétrica em cada faixa de operação com o método de controle de vazão por dampers e a estimativa do consumo futuro com a variação de velocidade do motor elétrico são obtidos em testes de variação do carregamento do sistema, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Medições do sistema de ar.

Carregamento	Q	P	I_vent1	I_vent2
[%]	[m³/s]	[N/m²]	[A]	[A]
37%	6,68	391	25	22,5
39%	6,94	391	25	22,5
39%	7,04	586	25	22,5
42%	7,49	488	25	22,5
49%	8,77	782	25	22,5
54%	9,65	782	26	22,5
63%	11,35	1270	27,5	25
63%	11,38	1270	27,5	25
73%	13,13	1661	27,5	25
75%	13,58	1661	27,5	25

As medições de vazão de ar (Q) são feitas por meio de diferencial de pressão entre a pressão na sucção dos ventiladores e a descarga, bem como a pressão (P) é obtida na descarga do ventilador, a corrente elétrica dos motores (I_vent1 e I_vent2) são fornecidas por amperímetros analógicos instalados no painel elétrico dos motores.

A variação do carregamento entre o mínimo de 37% e o máximo de 75% é realizada em função de restrições do sistema térmico, considerando os fatores de segurança em baixas vazões de ar e econômico na geração excedente de vapor.

6 Resultados Experimentais

A rotação varia linearmente com a vazão de ar do sistema, e desse modo, aplicando em (1) os parâmetros combinados das Tabelas 1 e 2, é possível calcular com (7), a velocidade necessária para suprir a demanda de ar nas faixas de vazão medidas.

$$N_{MIT} = \left(\frac{Q}{18,00} \right) \times 1780 \quad (7)$$

Sendo N_{MIT} a velocidade medida do motor em rpm, Q a vazão de ar medida em cada faixa de variação do carregamento em m³/s e 1780 rpm a rotação nominal do eixo.

Com a relação obtida em (7) e empregando (2) e (4), é calculada a demanda de potência com o controle de velocidade de rotação dos motores elétricos com (8).

$$P_{VR} = \left(\frac{N_{MIT}}{1780} \right)^3 \times P_{ATIVA} \quad (8)$$

Em (8) P_{VR} é a demanda medida de potência elétrica em kW para cada faixa de velocidade do motor (N_{MIT}).

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de demanda de potência para os métodos de operação com *dampers* e por variação da velocidade.

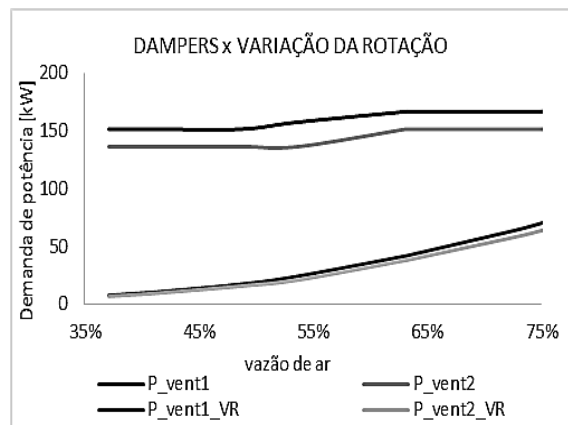


Figura 4. Demanda de potência elétrica.

Na Figura 4, a legenda P_{vent1} e P_{vent2} indicam a demanda de potência elétrica dos ventiladores 1 e 2 com operação de controle por *dampers*. As legendas P_{vent1_VR} e P_{vent2_VR} são, respectivamente, a demanda de potência por vazão de ar para operação com variação de rotação dos ventiladores 1 e 2.

7 Análise de Resultados

As medições utilizadas nos cálculos garantem confiabilidade na análise dos dados do sistema. No entanto, é um modo genérico de estimar a demanda

de potência e o consumo de energia elétrica em todas as faixas de operação do sistema.

O método utilizado para analisar e estimar os dados é o da regressão linear simples e ajuste cúbico, com as duas variáveis, vazão de ar (x) e demanda de potência (y).

O objetivo da análise de regressão é criar um modelo matemático na forma polinomial para determinar como a variável prevista (y) reage com o comportamento da variável independente (x) (Bass & Lawton, 2009).

A ferramenta estatística utilizada para determinar a medida de relação entre as variáveis é o coeficiente de correlação R^2 . Se esse coeficiente é igual a 1, indica uma relação perfeita entre as variáveis. Do mesmo modo, quando é zero, indica que não há nenhuma relação entre as variáveis, e o modelo matemático não é válido para descrever a correlação (Bass & Lawton, 2009).

Dessa maneira, a análise de regressão nos dados da Figura 4 fornece as equações das linhas de tendência para a demanda de potência em função da variação da vazão de ar.

Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos da análise de regressão para cada curva da Figura 4, bem como os valores do coeficiente de correlação entre as variáveis.

Tabela 3. Dados da análise de regressão.

Variável (y)	Modelo	R^2
P_{vent1}	$175,96 \times Q^{0,1638}$	0,8865
P_{vent1_VR}	$175,96 \times Q^{3,1638}$	0,9997
P_{vent2}	$159,93 \times Q^{0,1786}$	0,7985
P_{vent2_VR}	$159,93 \times Q^{3,1786}$	0,9992

A partir dos dados da regressão da Tabela 3, é possível caracterizar o consumo de energia elétrica para as faixas de variação da vazão de ar (Q) ao longo do ano, e estimar qual a economia de energia elétrica segundo (9).

$$Consumo_{EE} = \frac{P_{faixa} \times horas_{operação}}{1000} \quad (9)$$

Sendo $Consumo_{EE}$ o consumo de energia elétrica ao longo do período de tempo em MW/ano, P_{faixa} a demanda de potência com controle de vazão por *damper* ou de velocidade em kW e $horas_{operação}$ o total de horas de funcionamento em cada faixa de vazão de ar.

Os resultados do consumo de energia elétrica $Consumo_{EE}$ dos métodos de controle de vazão de ar para as faixas de carregamento são mostrados na Figura 5.

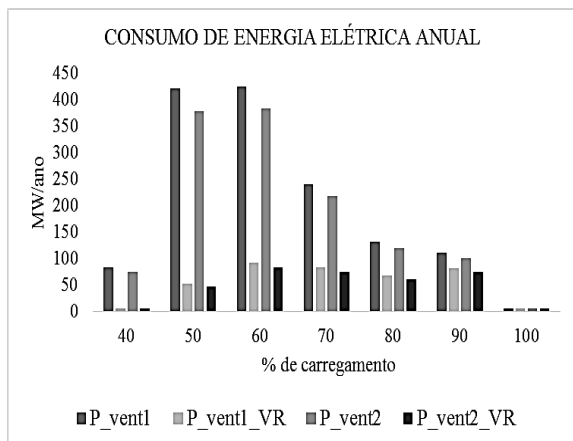


Figura 5. Consumo de energia elétrica.

Na Figura 5 é mostrado que o consumo de energia elétrica por faixa de carregamento é drasticamente reduzido em quase todos os níveis, quando é feito o controle de vazão de ar por variação da velocidade, exceto em pleno carregamento, que permanece inalterado.

Considerando 305,81 reais/MWh o custo médio nacional de energia elétrica praticado para a indústria (ANEEL, 2015), o custo operacional do sistema gerador de vapor, formado pelos dois ventiladores, e o custo calculado pelas estimativas de consumo do sistema de vapor com o novo método de controle de velocidade são apresentados na Figura 6.

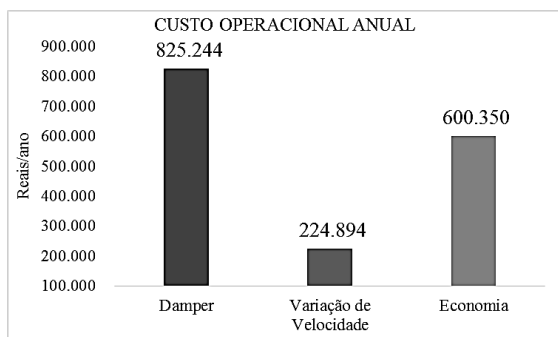


Figura 6. Custo operacional do sistema de vapor.

A coluna “Economia” na Figura 6 é a diferença do custo operacional entre os métodos de controle de vazão de ar por válvulas *damper* e a implementação dos variadores de velocidade, resultando uma redução anual de custos de 72,7%.

O consumo dos motores elétricos em plantas industriais representa 75% do consumo total de energia elétrica, e a aplicação de *variable speed drive* (VSD) é a melhor solução para a redução do consumo de energia elétrica, e, além disso, mais de dois terços dos motores elétricos na indústria são aplicados em bombas e ventiladores que não necessitam de velocidade constante para atender a demanda de processos (Saidur, Mekhilef, Ali, Safari, & Mohammed, 2012).

Como abordado na base teórica de cálculos, a demanda de potência no eixo varia com cubo da velocidade em ventiladores. Dessa maneira, ajustes

na rotação do motor de acordo com a demanda de carregamento geram grande redução no consumo de energia elétrica, e consequentemente nos custos dos processos industriais.

Além da redução do consumo de energia elétrica em 15-40%, a aplicação de VSDs reduz o impacto de partida e parada nos motores de indução (Saidur, Rahim, & Hasanuzzaman, 2009).

Considerando que a redução do custo de operação anual do sistema de vapor é projetada para 72,7% com a aplicação do novo método de controle em ambos os motores dos ventiladores 1 e 2, a estimativa de economia para cada conjunto motor e ventilador, é aproximadamente 36%, e dentro dos valores propostos por Saidur et al (Saidur, Rahim, & Hasanuzzaman, 2009).

8 Conclusão

A substituição do método de controle para ar de combustão do *damper* para o controle da velocidade mostra-se viável em função da redução da demanda de potência elétrica para suprir o processo de geração de vapor. É comprovada com a análise dos custos operacionais uma redução de 72,7% com a aplicação do método de controle por variação de velocidade.

Em todas as faixas de operação o controle por velocidade de rotação é adequado. Ainda que para o carregamento máximo as estimativas de consumo sejam iguais, de acordo com Saidur et al (Saidur, Rahim, & Hasanuzzaman, 2009) há a redução dos impactos negativos de partida e parada causados pela ligação direta dos motores a rede elétrica.

Fatores que encorajam a aplicação desse método para fins de eficiência energética é a ociosidade dos equipamentos rotativos, que em geral, trabalham com baixo carregamento, e demandando uma potência elétrica praticamente igual a nominal.

Referências Bibliográficas

- ANEEL. (março de 2015). *Agência Nacional de Energia Elétrica*. Fonte: ANEEL: <http://www.aneel.gov.br>
- Bass, I., & Lawton, B. (2009). *Lean Six Sigma - Using SigmaXL and Minitab*. USA: McGraw-Hill.
- Carlson, R. (Novembro/Dezembro de 2000). The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. Vol 36 No. 6.
- Elektro Eletricidade e Serviços S.A. (2014). *Manuais Elektro de eficiência energética*. Fonte: Sustentabilidade Elektro: <http://www.elektro.com.br>
- Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M., Safari, A., & Mohammed, H. (2012). Applications of

- variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 543-550.
- Saidur, R., Rahim, N., & Hasanuzzaman, M. (2009). A review on compressed-ar energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Shields, C. D. (1978). *CALDERAS. Tipos, Características y sus Funciones* (Vol. 6). México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Steimer, P. K. (2008). Power Electronics, a Key Technology for Energy Efficiency and Renewables. *IEEE Energy 2030 Conference*, (pp. 213-217). Atlanta.