



**Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Educação a Distância da UFSM – EAD  
Universidade Aberta do Brasil – UAB**

**Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos  
Processos Produtivos**

**Polo: Novo Hamburgo**

**MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VENTILADORES DE  
FORNO DE REAQUECIMENTO**

SILVA, Jonas Cordeiro da<sup>1</sup>

MICHELS, Ademar<sup>2</sup>

**RESUMO**

Este trabalho tem o objetivo geral buscar a redução do consumo de energia elétrica no processo de laminação de vergalhões e fio-máquina. O trabalho foi desenvolvido com o apoio de uma empresa siderúrgica. A metodologia do trabalho foi a análise dos sistemas auxiliares procurando identificar perdas, para posteriormente, eliminá-las ou reduzi-las. Foram analisados os sistemas de ventilação do forno de reaquecimento, foram realizadas medições das grandezas físicas do forno e dos seus ventiladores e partir daí, foram propostas alternativas de redução de consumo de energia. Além disso, buscou-se identificar situações em que os sistemas auxiliares possam ser desligados. Depois de identificadas as alternativas, foram apresentadas as propostas de projeto com seus respectivos ganhos para a empresa

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico. Professor(a) Orientadora. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

avaliar a atratividade destes investimentos. A aplicação de inversor de frequência para controle de vazão e o uso de tiragem natural se mostraram soluções de atrativo retorno para redução do consumo de energia elétrica.

**Palavras-chave:** eficiência energética, forno de reaquecimento, redução de consumo.

#### **ABSTRACT:**

This work has the overall goal of seeking the reduction of electricity consumption in the rolling of rebar and wire rod process. The work was developed with the support of a steel company. The methodology of the study was the analysis of the auxiliary systems identifying losses to subsequently eliminate them or reduce them. The ventilation systems of the reheat furnace were analyzed, measurements of physical quantities from the oven and its fans were taken and thereafter, some alternatives proposals to reduce energy consumption were be made. In addition, some situations in which the auxiliary systems may be switched off were identified. After the alternatives identified, the proposed project, with their gains, were made for the company to analyze the attractiveness. The application of frequency inverter to control the flow and use of natural draft proved attractive return solutions for reducing electricity consumption.

## **1 INTRODUÇÃO**

Atualmente há grande necessidade de otimização dos processos industriais, buscando-se o aumento da competitividade das empresas. Neste sentido, deve-se buscar sempre a redução de custos, aumento ou manutenção da qualidade dos produtos, isso sem se descuidar dos aspectos e impactos ambientais dos processos e da segurança do trabalho dos colaboradores na organização.

Dentro desta perspectiva, este trabalho tem o objetivo geral de buscar a redução do consumo de energia elétrica no processo de laminação.

Dentre as diversas formas de energia utilizadas pela sociedade, a energia elétrica realmente exerce um papel fundamental neste modelo de desenvolvimento, autonomia e da necessidade adotada pela maioria dos países. Em nível nacional,

milhões de consumidores encontram-se diretamente acoplados ao sistema elétrico brasileiro, nas modalidades de grande, médio e pequenos consumidores, com objetivos diversos, mas com finalidades técnicas bastante específicas, como acionamento motriz, aquecimento, luz e acionamentos dos equipamentos eletroeletrônicos nas suas diversas modalidades.

O aumento do consumo de energia elétrica pode gerar uma necessidade de expansão do sistema elétrico, ou ainda ocasionar um possível racionamento de energia elétrica, como ocorrido no Brasil em 2001 e 2002. Influenciado por este crescimento no consumo, torna-se cada vez mais necessário criação de projetos visando à eficiência energética.

As tarifas de energia elétrica têm aumentado acima dos índices Inflacionários, o consumo de energia elétrica está tornando-se significativo na economia das organizações.

Lima (2013) argumenta que a força motriz tem uma participação expressiva no consumo de energia elétrica. No setor industrial, ela representa cerca de 70% e no setor comercial e público representa 48%. Isso significa 38% do consumo total brasileiro.

Quando se trata de reduzir desperdícios e economizar energia, as principais recomendações incluem otimização do sistema motor-equipamento, substituição de motores superdimensionados, correção do fator de potência e redução dos picos de demanda.

Embora os motores de indução sejam máquinas intrinsecamente eficientes, esses se constituem um grande potencial de conservação de energia. Tal fenômeno é explicado devido à grande quantidade de motores instalados e aplicação ineficiente dos mesmos.

Quanto aos equipamentos, os que maior têm oportunidade de melhoria de sua eficiência são as bombas e os ventiladores, desta forma, buscou-se identificar um equipamento de grande consumo para desenvolver este trabalho, assim, foi estabelecido o foco de atuação nos ventiladores os fornos de reaquecimento das linhas de laminação a quente.

Salum (2011) comenta que o conceito de eficiência energética em sistemas de ventilação para equipamentos de combustão já foi abordado por (PINHEIRO & VALLE, 1995). Portanto, não é algo novo na indústria. Entretanto, a confiabilidade da

instrumentação, principalmente dos dampers, indicados por Bega (2003), são empecilhos para automatização plena e confiável do sistema de combustão da caldeira. Neste contexto surgem os conversores de frequência.

Embora o uso de conversores de frequência, comumente chamados de inversores de frequência, esteja amplamente associado a sistemas de bombeamento (DUTRA, 2005) e (MONACHESI & MONTEIRO, 2005), seu uso também é possível em outros equipamentos rotativos, como por exemplo, ventiladores, tema discutido por Salum (2011).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar fundamentos teóricos relacionados a ventiladores para o forno de reaquecimento, considerando especificamente os aspectos que levam a perda de energia elétrica, de modo a fornecer suporte teórico ao desenvolvimento deste trabalho.

### **2.1 Ventiladores**

#### **2.1.1 Definição**

Ventiladores são máquinas de fluxo geradoras que trabalham com fluido no estado gasoso provocando uma diferença de pressão inferior a 0,20kgf/cm<sup>2</sup> (VIANA, 2002).

O autor Henn (2001) faz a distinção entre ventilador e compressor, sendo que em um ventilador, a alteração da densidade entre a admissão e a descarga da máquina é tão pequena que o gás pode ser considerado com um fluido incompressível.

#### **2.1.2 Partes constituintes**

Simplificadamente pode-se considerar que suas principais partes são:

- O rotor (solidário a um eixo - parte móvel);
- A carcaça;
- O difusor (partes fixas).

A finalidade do rotor, também chamado “impelidor”, é transmitir energia cinética à massa do fluido por meio da energia mecânica que recebe de um motor, possibilitando a conversão dessa energia em energia de pressão, por meio do difusor. Essas transformações se dão conforme o teorema de Bernoulli e a Equação da Continuidade, pois, sendo o difusor, em geral, de seção crescente, proporciona a redução de velocidade do fluido que por ele escoar, com o conseqüente aumento da pressão na saída da carcaça.

### **2.1.3 Classificação**

Os equipamentos estudados aqui são ventiladores centrífugos, que são classificadas segundo a direção da conversão de energia, como máquinas de fluxo geradoras e segundo a trajetória do fluido, como centrífugos. Conforme Henn (2001), máquina de fluxo geradora é a que recebe trabalho mecânico e transforma em energia de fluido. E são centrífugos, ou radiais, pois recebem o ar pelo centro e o enviam na direção perpendicular ao eixo do rotor.

Os ventiladores podem ser classificados de diversas formas:

- De acordo com a trajetória do fluido no rotor em: centrífugos, axiais ou de fluxo misto;
- De acordo com a posição das pás do rotor: pás curvadas para trás; pás retas; pás curvadas para frente.

### **2.1.4 Curvas características dos ventiladores**

Muitas informações apresentadas aqui foram obtidas em fontes e trabalhos com bombas centrífugas, por serem equipamentos similares, alterando-se os fluidos, algumas informações serão apresentadas e podem ser usadas analogamente.

As características de desempenho, usadas em bombas centrífugas e ventiladores são representadas por curvas fornecidas pelos fabricantes. Elas traduzem o desempenho esperado de cada ventilador ou bomba.

São, basicamente, três as curvas características tradicionais:

- Curva de altura manométrica x vazão;
- Curva de potência absorvida x vazão;
- Curva de rendimento x vazão.

#### **2.1.4.1 Curva: Altura Manométrica X Vazão.**

É obtida a partir dos ensaios de pressão e vazão. Embora seja, teoricamente, uma parábola, devem-se descontar os efeitos do atrito, que mudam a curva teórica. Nos modelos simuladores, costuma ser interpolada por uma curva do segundo grau (parábola).

Esta curva representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total. O ponto de funcionamento dessa bomba em um determinado sistema é dado pelo cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba.

#### **2.1.4.2 Curva: Potência absorvida x vazão.**

Esta curva também é obtida dos ensaios no laboratório de hidráulica do fabricante. Esta representa a relação entre a vazão bombeada e a potência necessária para tal. É a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba ou ventilador. Não é a potência que é demandada da concessionária de energia elétrica. A potência elétrica é o resultado da divisão da potência dada pelo catálogo do fabricante pelo rendimento do motor.

#### **2.1.4.3 Curva: Rendimento x vazão.**

Esta curva mostra a região onde se dá os melhores rendimentos da bomba.

A eficiência energética deve ser buscada escolhendo um ventilador cujo ponto de funcionamento se dê o mais próximo possível do ponto de melhor rendimento da bomba.

#### **2.1.4.4 Alteração das curvas características de ventiladores**

As curvas características apresentam mudanças sensíveis de comportamento em função de alterações na estrutura de um ventilador ou na rotação de operação deste. É importante saber quais os fatores que a influenciam, e quais suas consequências.

Para alteração da rotação do ventilador tem-se:

- A vazão varia diretamente proporcional a variação da rotação conforme Equação 1.

$$Q_1 = Q_0 \cdot \frac{n_1}{n_0} \quad \text{Eq.(1)}$$

Equação 1 - Variação da vazão para uma variação de rotação.

- A altura manométrica varia proporcional ao quadrado da variação da rotação conforme Equação 2.

$$H_1 = H_0 \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

Equação 2 - Variação da altura manométrica para uma variação de rotação.

- A potência varia proporcional ao cubo da variação da rotação conforme Equação 3.

$$N_1 = N_0 \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^3 \quad \text{Eq. (3)}$$

Equação 3 - Variação da potência para uma variação de rotação.

- Q<sub>0</sub> - Vazão inicial, em m<sup>3</sup>/h;      Q<sub>1</sub> = Vazão final, em m<sup>3</sup>/h;  
 H<sub>0</sub> - Pressão inicial, em mca;      H<sub>1</sub> = Pressão final, em mca;  
 N<sub>0</sub> - Potência inicial, em cv;      N<sub>1</sub> = Potência final, em cv;  
 n<sub>0</sub> - Rotação inicial, em rpm;      n<sub>1</sub> = Rotação final, em rpm.

Os diferentes parâmetros construtivos dos ventiladores são importantes para determinação das curvas características (pressão, rendimento e potência) de operação de um ventilador.

### 2.1.5 Modo de operação

Os ventiladores não possuem mecanismos próprios para regulação de vazão. Deste modo, o ponto de operação de um ventilador é dado pela interseção entre a curva de operação do ventilador (pressão x vazão) e a curva da instalação (determinada a partir do somatório das perdas de carga da tubulação), conforme Figura 1.

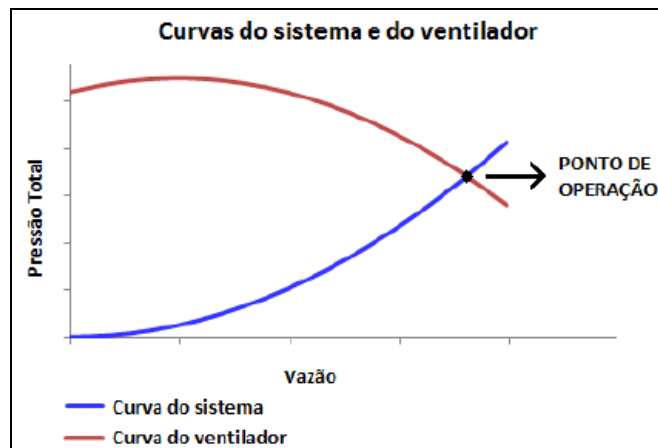


Figura 1 – Determinação do ponto de operação.

Fonte: SALUM (2011).

A alteração do ponto de operação dado só é possível mediante algum dispositivo com capacidade de regular da vazão.

### 2.1.6 Regulação de vazão em sistemas de ventilação

Uma vez que os ventiladores sozinhos não são capazes de regular a vazão do sistema, é necessário utilizar equipamentos auxiliares para este fim, dos quais se destacam:

- Válvulas de controle (*Dampers*);
- Variadores de velocidade.

#### 2.1.6.1 Regulação de vazão por *damper*

Os *dampers* são válvulas, dispositivos mecânicos de restrição utilizados para controle da vazão de ar em sistemas de ventilação. Esses dispositivos podem ser instalados na descarga ou na sucção dos ventiladores.

A operação dos *dampers* restringe a quantidade de ar à medida que o *damper* vai restringindo a passagem do fluido por meio do acionamento de um atuador que pode ser elétrico, pneumático ou hidráulico. Com o fechamento, observa-se um aumento da pressão na descarga, reduzindo a vazão de saída do ventilador e, portanto, modificando o ponto de operação do sistema.



Em relação à movimentação do ponto de operação, a variação do percentual de abertura dos *dampers* significa um acréscimo (ou decréscimo) da perda de carga no sistema. Portanto, tal modificação representa uma alteração na curva do sistema, conforme pode ser visto na Figura 2.

Uma vez que as curvas do ventilador não se alteram, a modificação do ponto de operação incorre em variações no consumo de potência e no rendimento da máquina, conforme Figura 2.

Em geral, os ventiladores são especificados para operar numa região próxima ao ponto de máxima eficiência, garantindo a operação econômica do conjunto.

Assim, quando há variação do ponto de operação por influência do damper, há por consequência uma redução da eficiência do ventilador.

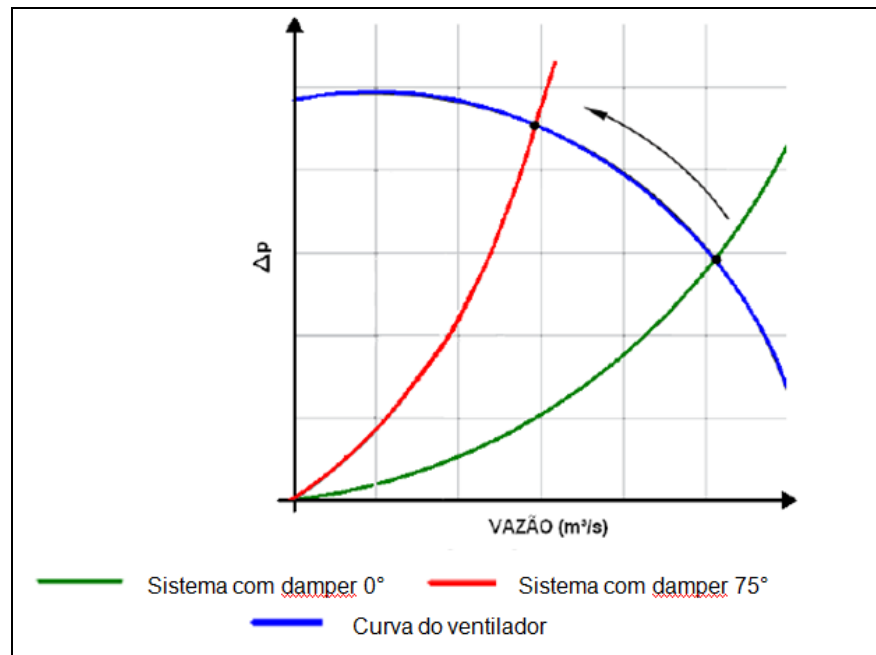


Figura 2 – Efeito do estrangulamento na modificação da curva do sistema.

Fonte: SALUM (2011).

Os variadores de velocidade mais comuns utilizados na indústria são:

- Conversor de frequência (para conjunto motor+ventilador);
- Governador eletrônico (para conjunto turbina+ventilador).

## 2.2 CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

### 2.2.1 Definição

Conversores de frequência são “dispositivos eletrônicos, que atuam sobre a frequência da corrente dos motores, variando a sua rotação. Considerando que ventiladores, bombas e outras máquinas rotativas nem sempre operam em plena carga e que as vazões estão linearmente relacionadas com a rotação da máquina, a utilização de variadores de frequência possibilita o ajuste de vazão sem introduzir perdas, alterando a rotação da máquina” (PANESI, 2006).

### 2.2.2 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos conversores de frequência é baseado na modificação da frequência da tensão elétrica de alimentação do motor do ventilador, permitindo a variação da sua velocidade de rotação. Conforme a equação 4, a velocidade de rotação de um motor é proporcional à frequência da corrente elétrica que o alimenta.

$$vel_M = \frac{120 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$$

Eq. 4

Onde:

vel<sub>M</sub>: Velocidade de rotação do motor

p: Número de pólos do motor

f: Frequência da corrente elétrica

s: Escorregamento do motor

Como a potência elétrica fornecida aos motores é proporcional à velocidade de rotação do eixo do motor, conforme equação 5, então, por consequência, a variação da frequência da corrente elétrica implica na variação da potência fornecida ao ventilador pelo eixo do motor.

$$Pot_M = \frac{C_M \cdot \omega}{\eta}$$

Eq. (5)

Equação 5 – Potência em motores acionados por inversor

Onde:

$P_{M}$ : Potência elétrica do motor

$C_M$ : Conjugado motor

$\omega$ : Velocidade angular do eixo

$\eta$ : Rendimento do motor

A utilização de variadores de velocidade em ventiladores também permite uma melhor regulação da vazão de ar em relação ao uso de *dampers*, permitindo uma melhor e mais eficiente controle. Isso é possível porque os *dampers* estão mais sujeitos a travamentos, além de não serem muito precisos na regulação da vazão de ar.

A Figura 3 mostra o consumo, potência, no eixo y, de acordo com a velocidade ou rotação do motor, no eixo x. A figura mostra várias linhas, cada linha é uma forma de controle de vazão adotada. A forma “*by-pass control*”, que é uma linha horizontal, é a pior forma de controle em termos energéticos pois consome a mesma potência, independente da rotação. As outras formas apresentadas, da menos eficiente até a mais eficiente: válvula na saída do ventilador (*damper control*), válvula na entrada do ventilador (*Inlet valve control*), controle liga/desliga (ON/OFF cycling), Controle de velocidade com acoplamento magnético, Controle com conversor ou inversor de frequência (*Speed control with VSD*). Percebe-se que a forma mais eficiente energeticamente é com inversor de frequência. Outras análises importantes podem ser feitas a partir desta figura: por exemplo, se o ventilador tem momentos de trabalho a 50% de sua vazão (50% da rotação conforme equação 1), comparando com o controle com válvula na entrada (modelo dos ventiladores deste estudo), o potencial de economia chega a quase 30%.

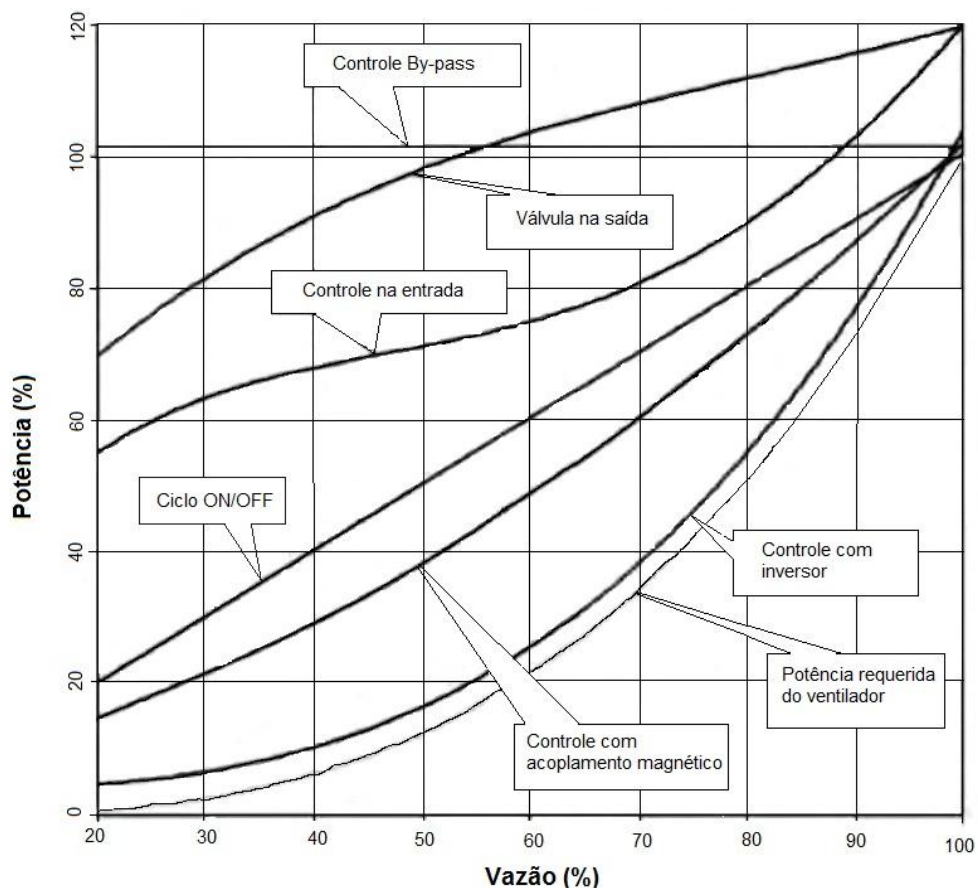


Figura 3 – Métodos de controle de fluxo de ventiladores Energy Efficiency.  
 Fonte: Adaptado de *Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, Paul Waid and Conrad U. Brunner, Agência Internacional de Energia, 2011.

Lima (2013) apresenta uma curva teórica (Figura 4) que apresenta a diferença de consumo entre os modos de controle de vazão: válvula ou inversor.

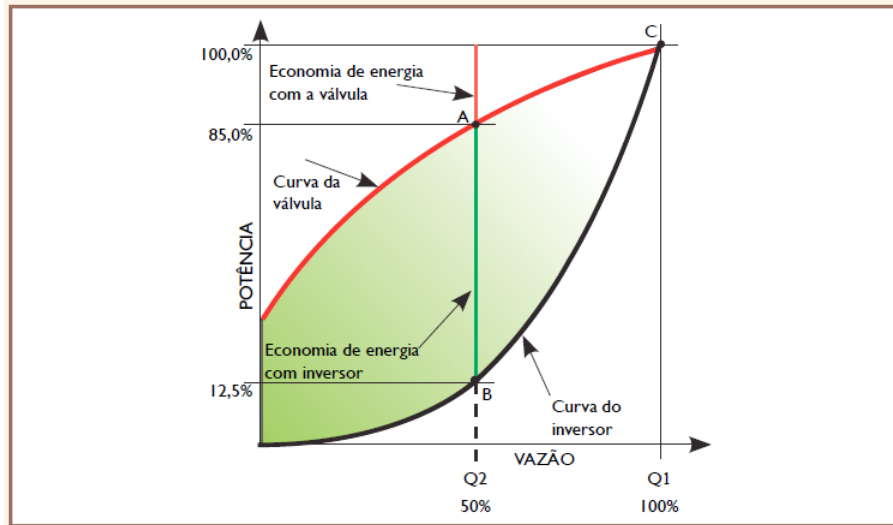


Figura 4 – Curva de Potência em relação à variação de vazão, comparação entre o uso de válvula e inversor.

Fonte: Lima (2013)

Outros autores, como Vasconcellos (2013), desenvolveram trabalhos em máquinas de fluxo geradoras, Vasconcellos (2013) obteve o gráfico experimental da Figura 5, em uma bomba centrífuga.

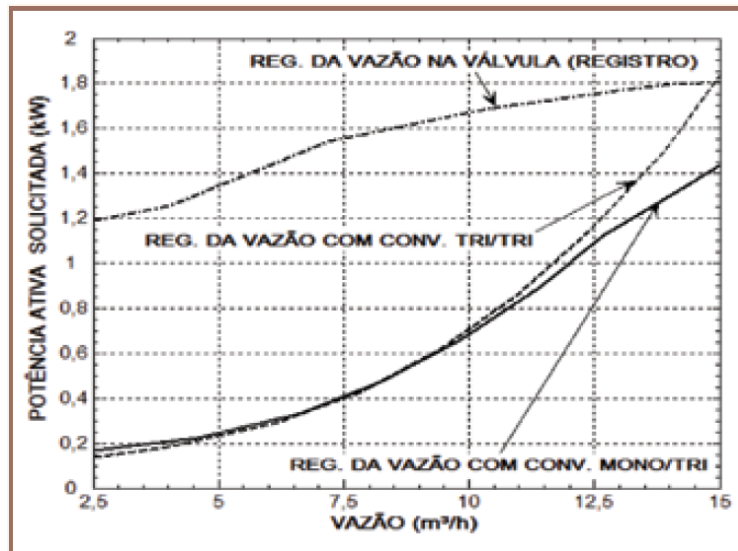


Figura 5 – Comparação de potência e métodos de variação da vazão.

Fonte: Vasconcelos (2013).

## 2.3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor elétrico de indução do tipo gaiola de esquilo é o mais importante uso final de energia elétrica no País. No Brasil, a quantidade de energia por ele processada é superior a 30% da energia elétrica total gerada de acordo com Shindo (2002). Diante disto, qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar o rendimento destes equipamentos trará grande economia ao País.

Existem no mercado motores classificados como "standard" (motores da linha padrão ou convencional), também uma linha de produtos denominada Motor de Alto Rendimento.

No Motor de Alto Rendimento, a redução das perdas, com o consequente aumento da eficiência, foi obtida com o aumento dos custos de fabricação. Assim, motores de alto rendimento são mais caros do que os motores da linha padrão. No entanto, por serem mais eficientes, gastam menos energia que os motores da linha padrão para a mesma aplicação. Em consequência, este custo adicional de aquisição é compensado pelo menor custo operacional.

No Brasil, o rendimento é determinado através da norma NBR 5383, que está sendo revisada para se basear no método de segregação das perdas com dinamômetro da norma canadense CSA C390-M1985. Fonte Shindo (2002).

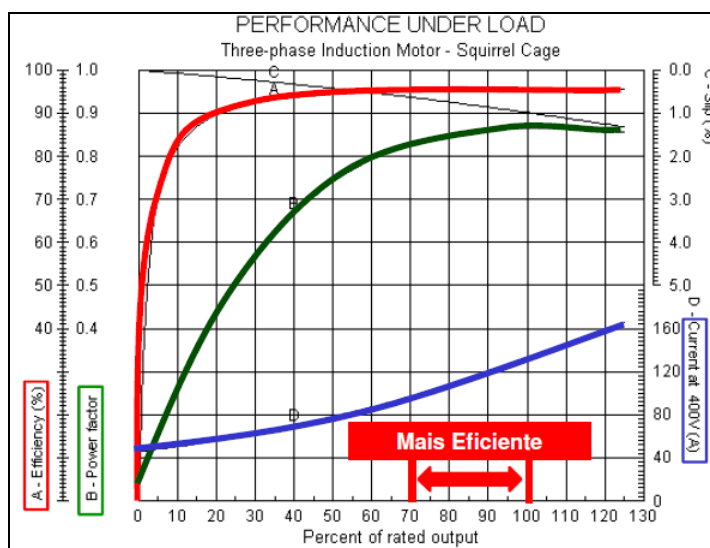


Figura 6 – Curvas de rendimento e fator de potência.

Fonte: Venero (2011).

A curva da Figura 6 mostra além do rendimento o fator de potência, entre outros, para este motor apresentado pelo autor, o rendimento reduz significativamente somente abaixo de 20% da carga nominal, porém, o fator de potência reduz bastante abaixo dos 70%.

### **2.3.1 Dimensionamento do Motor**

Shindo (2002), explica que no Brasil, o superdimensionamento de motores é uma das causas mais comuns da operação ineficiente.

Conforme Venero (2013), em condição normal de funcionamento, o motor deve ser adequado à carga, ou seja, deve operar entre 75% e 100% da potência nominal. Por exemplo, se o dimensionamento mostra que a carga é de 35 cv, um motor de 40 cv deverá ser usado operando com 88% da potência nominal.

Quando um motor é usado para atender a uma carga constante como uma bomba hidráulica em uma estação elevatória, o motor deve ser dimensionado o mais próximo possível de 100% da potência nominal.

O motor de alto rendimento bem dimensionado proporcionará uma máxima economia de energia, permitindo obter elevados rendimento e fator de potência.

Quando se necessita operar um motor de indução acionado por um conversor de frequência, deve-se especificar um motor adequado para este tipo de acionamento. O isolamento do motor deve suportar maiores temperaturas e maiores picos de tensão e as estruturas ferromagnéticas devem apresentar menores perdas por histerese e correntes de Foucault, visto que o motor operará com frequências harmônicas. Os motores de alto rendimento são mais adequados para acionamento com conversores de frequência.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Comprovar tecnicamente e economicamente a viabilidade de soluções para redução do consumo de energia elétrica do forno de reaquecimento do processo de laminação.

### **3.2 Objetivo específico**

- Realização de diagnóstico do consumo de energia elétrica do forno de reaquecimento;
- Melhoria no conhecimento existente na empresa em relação aos sistemas auxiliares processo de laminação;
- Calcular o potencial de economia anual com a redução do consumo de energia elétrica nos ventiladores do forno de reaquecimento.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Características da empresa e processo analisado**

A empresa, proprietária do equipamento em estudo, solicita que não seja identificada, mas, trata-se de uma empresa que trabalha no ramo de metais e possui outros equipamentos similares em outras plantas, o que torna o estudo ainda mais interessante no sentido de replicação dos ganhos gerados.

Entre os processos de conformação mecânica, realizados pela empresa, está a laminação a quente, que consiste em reduzir plasticamente a seção transversal do componente processado ao comprimi-lo entre dois cilindros paralelos. Estes cilindros giram em sentidos opostos e estão posicionados a uma distância especificada que define a espessura final do produto laminado. A fim de reduzir a força exercida sob os cilindros de laminação, este processo é realizado a alta temperatura, sendo o Forno da Laminação responsável pelo aquecimento dos lingotes processados nos laminadores. Neste forno, o aquecimento dos lingotes é promovido pela queima de gás natural e os gases da combustão são direcionados à atmosfera pelo sistema de exaustão do forno, o qual também será avaliado neste trabalho.

A empresa parceira deste trabalho, além de disponibilizar acesso aos equipamentos de estudo, também cedeu acesso ao histórico de dados referente ao forno, os consumos de gás natural, as vazões de ar, temperaturas e demais dados disponibilizados pela instrumentação do equipamento. Os experimentos foram desenvolvidos na planta industrial que utiliza um forno do tipo soleira móvel (como



da Figura 7). Mais especificamente, o trabalho foi desenvolvido com os 2 ventiladores indicados pelos números 1 e 2 na Figura 7.

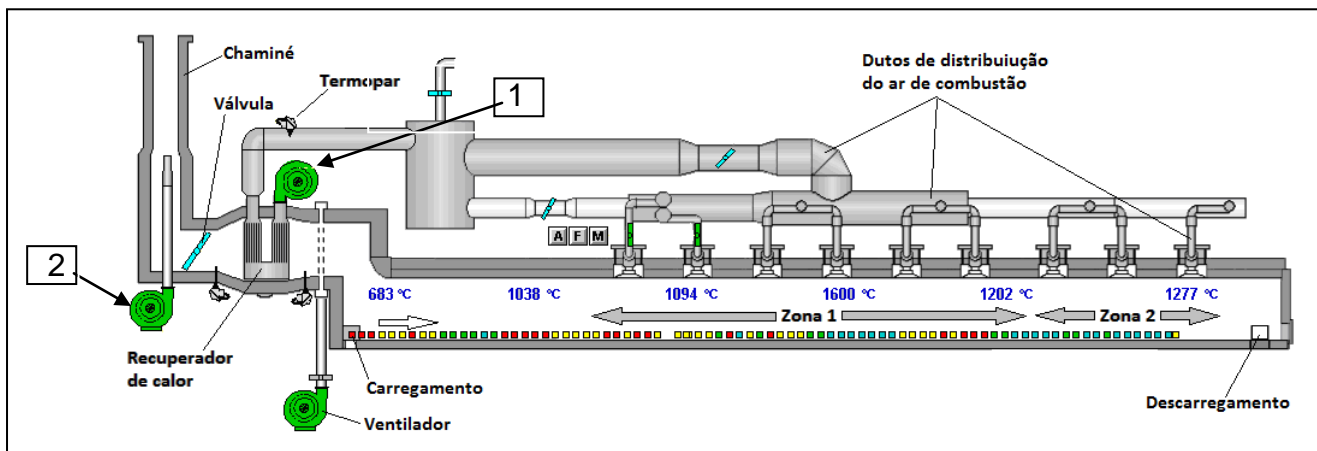


Figura 7 - Desenho esquemático do corte longitudinal de um forno do reaquecimento do tipo Soleira Móvel utilizado no trabalho. Fonte Silva (2012).

## 4.2 Apresentação do Sistema Analisado

O Sistema de exaustão do forno é constituído por uma chaminé, responsável por lançar os gases de exaustão para a atmosfera, um ventilador de tiragem de gases e um damper de controle, que regula a pressão interna do forno. Estão presentes ainda neste sistema, um ventilador de ar de diluição e um pré-aquecedor de ar, que troca calor com o ar ambiente para que seja insuflado a alta temperatura na câmara de combustão do forno. A presença do ventilador de ar de diluição se justifica para eliminar o excesso de gás natural injetado na combustão e também para resfriar o recuperador de calor, em caso de sobre aquecimento.

Já o ventilador de tiragem é responsável por garantir o diferencial de pressão necessário para que o fluxo de gases de exaustão do forno para a atmosfera seja contínuo.

Na Figura 7 é apresentado um desenho ilustrativo com os principais constituintes do sistema de exaustão e na Figura 8 um fluxograma esquemático do circuito de ar e de gases do forno. Nesta figura as linhas em azul claro representam o ar ambiente, em amarelo este ar após passar pelo pré-aquecedor, em vermelho os gases de exaustão após saírem do forno e em alaranjado após passarem pelo pré-aquecedor de ar. Os dampers de controle estão representados na sucção dos

ventiladores de ar de combustão e de tiragem de gases, bem como no duto entre a chaminé e o pré-aquecedor de ar.

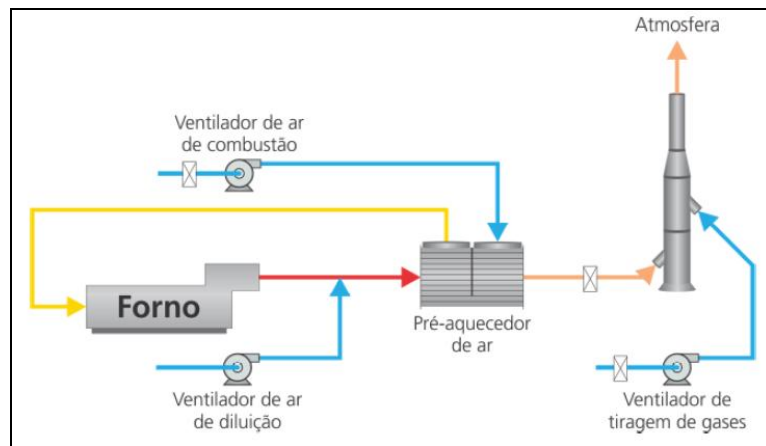


Figura 8 - Fluxograma do circuito de ar e de gases do forno

#### 4.3 Metodologia adotada para implantação do projeto

Com o objetivo de avaliar as condições de exatão da chaminé e dos demais constituintes do sistema foram realizadas medições em campo, entre os dias 5 e 6 de junho de 2014, dos seguintes parâmetros operacionais: potência elétrica dos ventiladores de ar de combustão e de tiragem de gases, pressão de sucção e de descarga do ar de combustão, temperatura ambiente e temperatura, pressão e composição química dos gases de exatão. As medições e muitos resultados que serão apresentados foram obtidos com a parceria com a empresa Tractebel Energia.

Do sistema supervisório da planta foram coletados dados de vazão de gás natural, ar de combustão, ar de atomização e pressão interna do forno. Devido à impossibilidade técnica de aquisição destes dados para o mesmo intervalo de tempo em que ocorreram as medições, considerou-se que as etapas em carga e fora de carga são cíclicas e ocorrem com parâmetros equivalentes.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de analisadores de energia portáteis foram monitoradas as potências elétricas dos ventiladores de ar de combustão e de tiragem de gases. A Figura 9 apresenta a potência elétrica medida para o ventilador de ar de combustão, na qual é possível observar a característica cíclica de operação deste equipamento.

Nesta figura os períodos definidos como FC e EC correspondem, respectivamente, ao forno operando fora de carga e em carga.

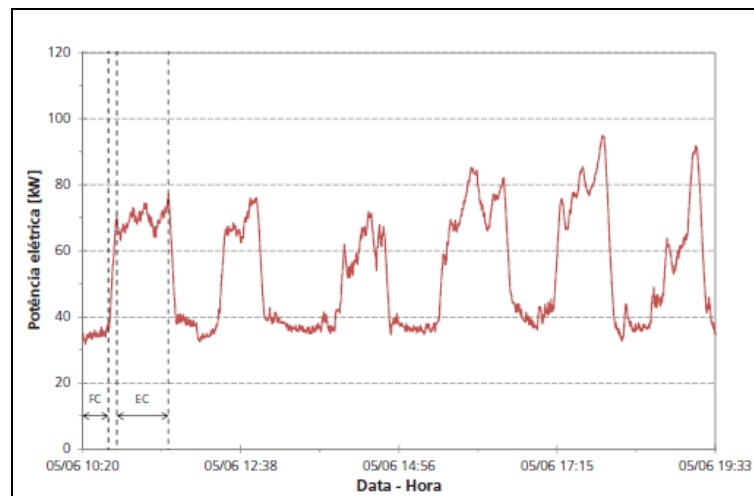


Figura 9- Potência elétrica ventilador de ar de combustão

Na Figura 10 está ilustrada a potência elétrica do ventilador de tiragem de gases. Como o funcionamento deste ventilador é contínuo e, por consequência, também o seu consumo, a potência elétrica para este foi monitorada em um menor intervalo de tempo.

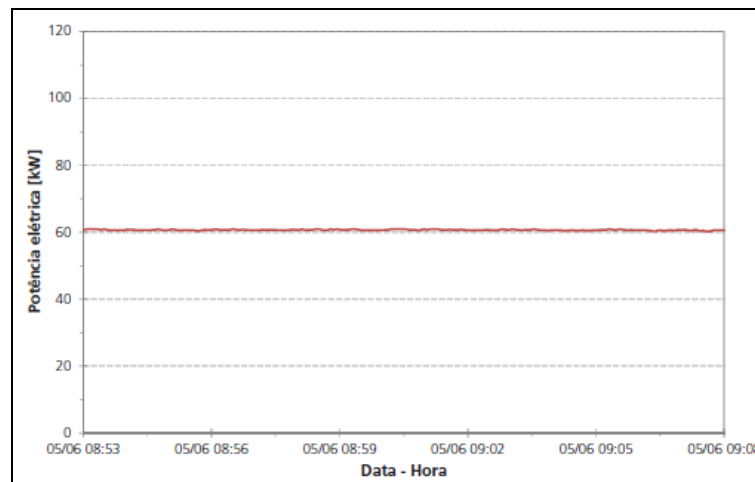


Figura 10 - Potência elétrica ventilador de tiragem

Na Tabela 1 são mostrados os valores médios de potência elétrica dos ventiladores de ar de combustão e de tiragem de gases.

Tabela 1 – Resumo potências ventiladores

Condição	Potência elétrica [kW]	
	Ar de combustão	Tiragem de gases
Fora de carga	38,4	
Em carga	69,3	60,7
Média	53,7	

Na Figura 11 são apresentadas as curvas de pressão de sucção e de descarga do ventilador de ar de combustão durante o período de medições, bem como a pressão diferencial atingida por este, que consiste na diferença entre as pressões de sucção e descarga.

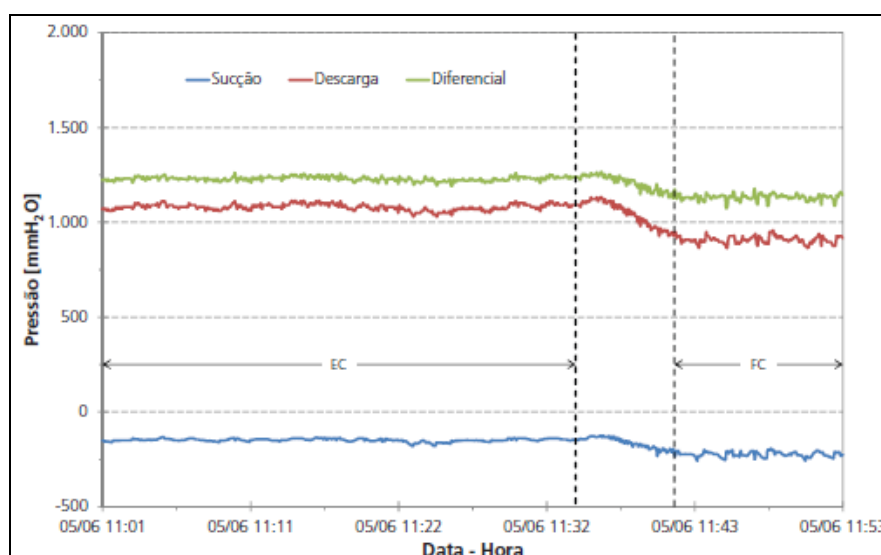


Figura 11 – Pressões ventiladores

A Tabela 2 mostra as pressões médias de sucção e de descarga e diferencial do ventilador de ar de combustão.

Tabela 2 – Resumo pressões

Condição	Pressão [mmH <sub>2</sub> O]		
	Sucção	Descarga	Diferencial
Fora de carga	-224,5	907,5	1.132,0
Em carga	-149,0	1.080,8	1.229,8

A temperatura dos gases de exaustão foi monitorada concomitantemente às medições de temperatura ambiente através do mesmo instrumento de medição. As medições foram realizadas após o pré-aquecedor de ar para que a temperatura monitorada fosse coincidente com aquela a que os gases são exauridos.

A Tabela 3 mostra a temperatura média dos gases de exaustão monitorada no duto do Forno.

Tabela 3 – Temperatura média gases exaustão

Condição	Temperatura [°C]
Fora de carga	482,0
Em carga	569,7

Através do mesmo equipamento utilizado nas medições de temperatura ambiente e dos gases de exaustão foi obtida a pressão destes no interior do duto na base da chaminé. Para esta medição o equipamento foi instalado após o damper de controle, na entrada da chaminé.

Na Figura 12 são apresentadas as curvas de vazão de ar de combustão para as duas zonas de aquecimento.

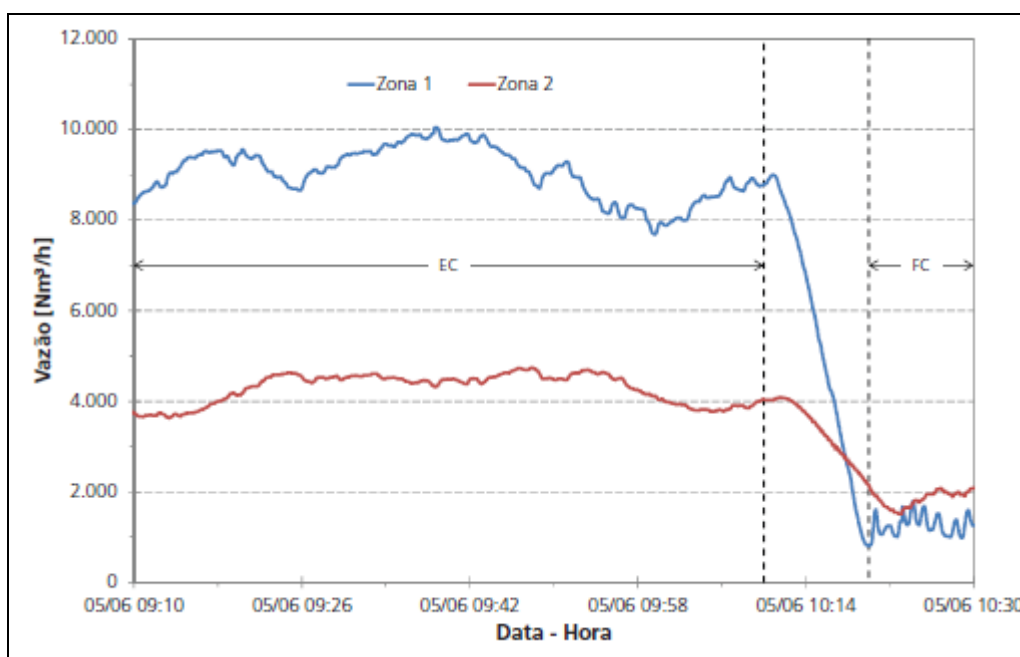


Figura 12 - Vazão ar de combustão

A partir da Figura 12 - Vazão ar de combustão, conseguiu-se o seguinte resultado de vazão do ar de combustão média: em carga – 13.325,7 m<sup>3</sup>/t e fora de carga – 3.114,6 m<sup>3</sup>/t. A partir desta informação e das pressões apresentadas na tabela 3, pôde-se calcular a potência requerida pelo ventilador do ar de combustão (potência útil) e a partir das potências médias, apresentadas pela Tabela 1, chega-se ao valor do rendimento total médio (Tabela 4).

Tabela 4 – Resumo potência e rendimento

	<b>Vazão média ar de combustão (m<sup>3</sup>/t)</b>	<b>Pressão descarga (mmCA)</b>	<b>Potência útil (kW)</b>	<b>Potência demandada no motor (kW)</b>	<b>Rendimento total médio (%)</b>
Em carga	13325,7	1229,8	44,61	69,30	64,37
Fora da carga	3114,6	1132,0	9,60	38,40	24,99

## 5.1 Análise dos Dados

Esta seção tem como objetivo, com base nas medições realizadas e nos dados coletados em campo, obter os parâmetros característicos do desempenho operacional do Forno.

### 5.1.1 Ventilador de combustão

Como alternativas para efficientização do sistema de exaustão do Forno foram avaliadas as possibilidades de instalação de inversor de frequência no motor do ventilador de ar de combustão e de substituição do sistema de exaustão atual por um com tiragem natural dos gases.

O damper localizado na sucção do ventilador de ar de combustão é utilizado para controle da vazão de ar que deve ser injetada na combustão. Todavia, este controle de vazão induz ao ventilador uma maior perda de carga, ocasionada pela obstrução gerada por este componente, reduzindo a sua eficiência e elevando a sua potência elétrica.

Efeito similar ao controle de vazão descrito anteriormente seria obtido pela instalação de um inversor de frequência no motor do ventilador, que regularia a vazão pela variação da sua rotação.

Para avaliar o potencial de ganho, foi feito um levantamento de dados durante o mês de outubro de 2014, onde foram tomadas leituras a cada 5 minutos a partir da base de dados do sistema de controle do forno. Foram coletados, diversos dados, entre eles a pressão da rede do ar de combustão e a vazão, sendo possível assim, calcular a potência útil, gerada em energia hidráulica.

Os dados foram exportados como forma de texto para que pudessem ser manuseados no Microsoft Excel, como ficou uma base de dados muito extensa, com medições de um mês inteiro a cada 5 minutos, este não serão todos aqui expostos.

Um dos resultados obtidos a partir da análise dos dados de interesse é o perfil de vazão do ventilador do ar de combustão. A Figura 13 mostra como é o perfil de vazão do ar de combustão.

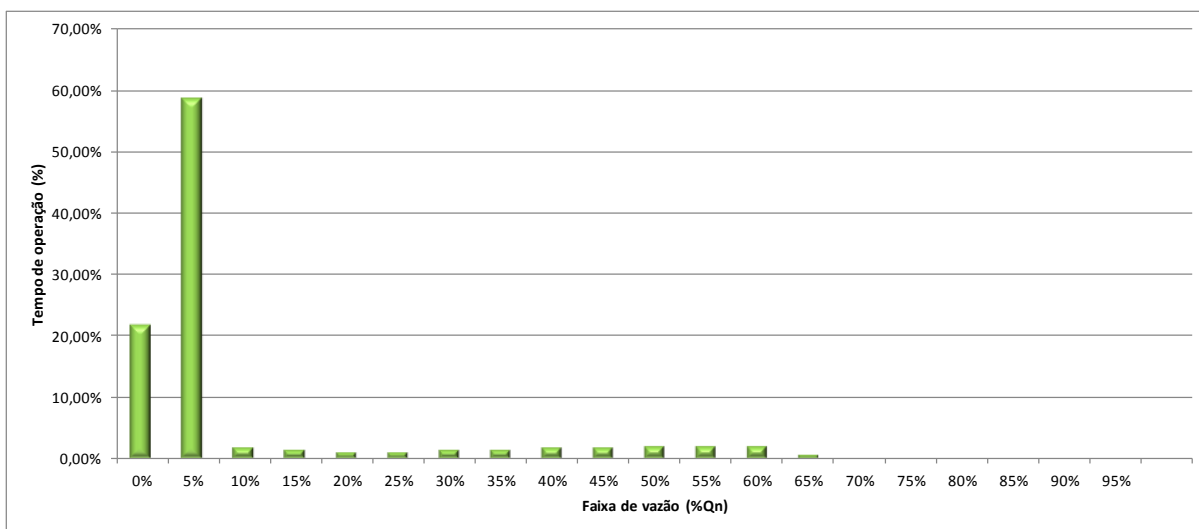


Figura 13 – Tempo de operação conforme vazão do ventilador de combustão

No gráfico da Figura 13, no eixo das abscissas, a coluna da vazão indicada por “0%” indica vazões de 0% até 5% da vazão nominal, na coluna “5%”, são vazões maiores que 5% até 10% da vazão nominal. Assim, percebe-se nitidamente que o ventilador opera mais de 20% do tempo em vazões menores do que 5% da vazão nominal. Se somarmos o tempo de operação em vazões menores, pode-se notar pela análise da Figura 13, que o ventilador do ar de combustão opera aproximadamente 80% do tempo em vazões abaixo de 10% da nominal, o que representa um grande potencial de economia de energia. Pela figura 10, pode-se deduzir que o potencial de redução do consumo de energia elétrica nesta faixa de vazão pode chegar a 70%. Para levantar de forma mais apurada o potencial de ganho foi desenvolvida a tabela.

Quadro 1 - Consumo do sistema atual e proposto

Q/Qn(%)	Q(m <sup>3</sup> /h) (máximo da faixa)	Tempo (%)	Tempo ano (h)	Potência atual (kW)	Potência proposta (kW)	Redução potência (kW)	Economia anual (kWh)
0%<Q/Qn<5%	1055	21,75%	1905	32,17	5,07	27,10	51.638
5%<Q/Qn<10%	2109	58,61%	5134	35,36	10,13	25,23	129.520
0%<Q/Qn<15%	3164	1,89%	166	38,55	15,20	23,35	3.869
0%<Q/Qn<20%	4218	1,46%	128	41,74	20,26	21,48	2.754
0%<Q/Qn<25%	5273	1,17%	103	44,93	25,33	19,60	2.011
0%<Q/Qn<30%	6327	1,09%	96	48,12	30,39	17,73	1.696
0%<Q/Qn<35%	7382	1,45%	127	51,31	35,46	15,85	2.017
0%<Q/Qn<40%	8436	1,62%	142	54,50	40,53	13,98	1.985
0%<Q/Qn<45%	9491	1,95%	171	57,69	45,59	12,10	2.065
0%<Q/Qn<50%	10545	1,90%	167	60,89	50,66	10,23	1.705
0%<Q/Qn<55%	11600	2,05%	180	64,08	55,72	8,35	1.499
0%<Q/Qn<60%	12654	2,21%	193	67,27	60,79	6,48	1.252
0%<Q/Qn<65%	13709	2,06%	180	70,46	65,85	4,60	831
0%<Q/Qn<70%	14763	0,77%	67	73,65	70,92	2,73	183
0%<Q/Qn<75%	15818	0,01%	1	76,84	75,99	0,85	1
						Total economia (kWh) ->	203.026

Na Quadro 1 pode-se verificar que a redução potencial do consumo energético por ano seria de 203.026 kWh, o que financeiramente daria um retorno anual de R\$31.672,06. Sobre estes cálculos, cabem algumas observações:

- Na segunda coluna, foi considerada a vazão máxima em cada faixa, sendo assim, na primeira linha, tomou-se 5% da vazão nominal, na segunda linha 10%, e assim por diante;
- O tempo de operação (%) foi feito através da contagem do número de vezes em que o ventilador estava operando naquela faixa de vazão dividindo-se pelo total de leituras, considerando as medições a cada 5 minutos e efetuadas no mês de outubro deste ano;
- O tempo de operação de cada faixa de vazão foi feito simplesmente multiplicando-se o % por 24 e por 365 (24 horas no dia, em 365 dias no ano);
- A potência atual foi feita através das leituras efetuadas nos dias 5 e 6 de junho, através da média, apresentada na Tabela 4, sendo que através dos dados da tabela 5, foi considerado como uma reta, isto foi feito para simplificar, pois o perfil esperado seria o apresentado na Figura 3;



- A potência proposta foi feita considerando a vazão da coluna 2, pressão máxima do ventilador, de 1500mmCA, o que é conservador, pois se sabe que a pressão requerida é menor, e também foi o rendimento total de 0,85%.

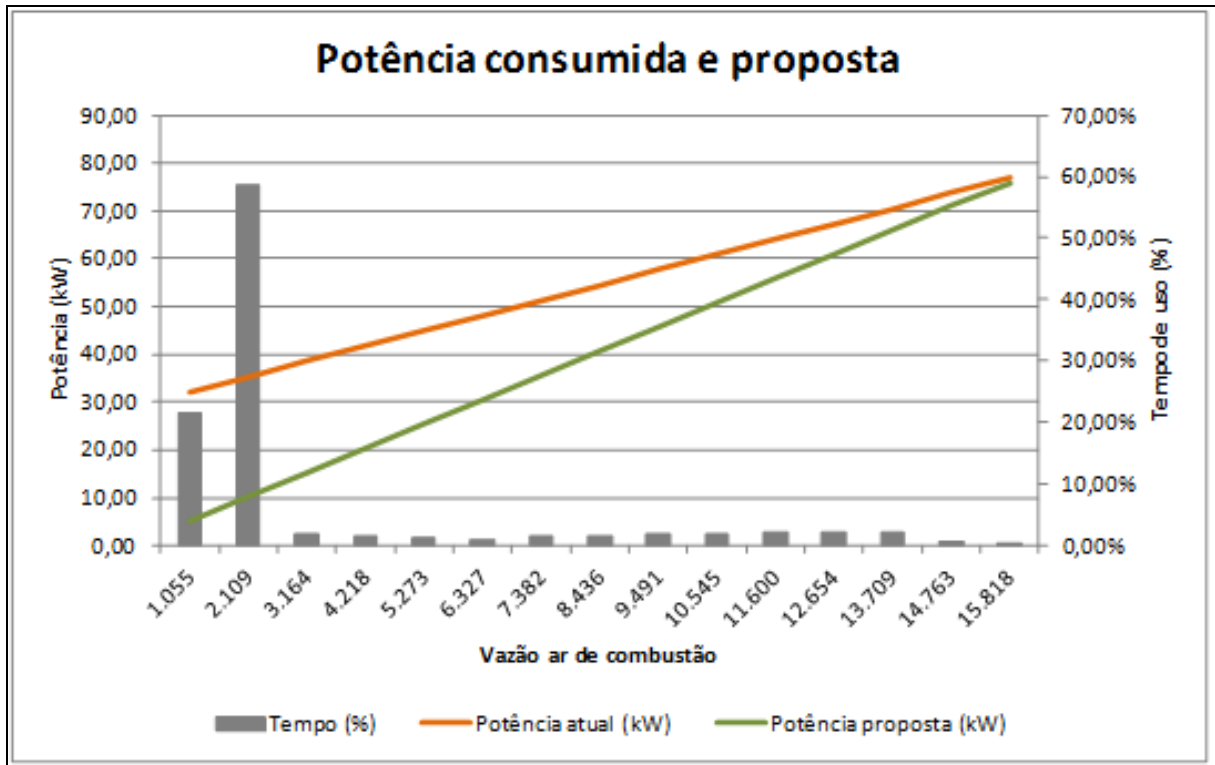


Figura 14 – Potência consumida atual e proposta

A Figura 14 mostra os resultados apresentados na Figura 7. As linhas verde e laranja mostram a potência proposta e a potência atual, a redução da potência e por consequência da energia elétrica consumida, se dá através da troca do atual sistema de controle, que é por válvula de restrição na sucção do ventilador, por um sistema com inversor de frequência. Comparando-se com a Figura 3, as linhas da Figura 14 esperadas seriam curvas e não retas, mas esta forma aparece devido a forma em que foram montadas, a potência proposta foi obtida multiplicando-se a vazão de cada faixa, que está distribuída escalonada, linearmente, pela pressão máxima do ventilador, portanto, constante, e também o rendimento foi considerado constante para cada vazão. A potência consumida atualmente também foi obtida de forma linear, conforme já mencionado, a partir dos dados da Tabela 4.

### 5.1.2 Ventilador de tiragem

A vazão de gases de exaustão na entrada da chaminé para as condições atuais de operação do forno é calculada com base nas vazões de gás natural e nas composições químicas do gás natural e dos gases de exaustão.

Na Tabela 5 são mostradas as vazões médias de gases de exaustão para as duas condições avaliadas.

Tabela 5 - Resumo vazão gases exaustão

Condição	Vazão [Nm <sup>3</sup> /h]	Acréscimo	
		Absoluto [Nm <sup>3</sup> /h]	Percentual [%]
Fora de carga	11.778,0	15.665,0	133,0
Em carga	27.443,0		

Nesta tabela se percebe que o incremento observado na vazão de gases de exaustão não é da ordem daqueles observados para as vazões de ar e de combustível da mistura, o que é consequência direta dos diferentes níveis de excesso de ar calculados para as duas condições. Entre a saída do forno e o ponto onde foram tomadas as medições, a corrente de gases é impelida contra diversas barreiras que tendem a alterar a pressão interna do fluxo. Entre os principais componentes do sistema que tendem a dificultar a passagem do fluxo de gases estão o pré-aquecedor e o damper de controle, situados no duto de gases na base da chaminé.

Na Tabela 6 são apresentadas as pressões no interior do forno e do ponto de medição, além da perda de carga, que corresponde à diferença entre estas.

Tabela 6 – Resumo pressão chaminé

Condição	Pressão [mmH <sub>2</sub> O]		
	Forno	Ponto de medição	Perda de carga
Fora de carga	0,8	-3,5	4,3
Em carga	0,8	-23,0	23,8

Na configuração atual do sistema de exaustão, a tiragem de gases do forno é realizada em conjunto pela chaminé e pelo ventilador de tiragem. Objetivando a redução do consumo de energia elétrica deste sistema foi avaliada a viabilidade da

substituição da exaustão forçada utilizada atualmente por uma com tiragem natural dos gases apenas.

Com este propósito foram realizadas simulações a partir dos dados medidos e coletados com a intenção de determinar a altura necessária da chaminé para que ocorra uma eficiente exaustão natural dos gases provenientes da queima do combustível.

A Tabela 7 mostra os parâmetros considerados na simulação da altura da chaminé em função da vazão de gases de exaustão e a Figura 15 ilustra o resultado da simulação realizada. Nesta figura os pontos destacados representam as condições operacionais da chaminé durante as medições.

Tabela 7 – Condições gases da chaminé

Parâmetro	Condição	
	Fora de carga	Em carga
Temp. do ar ambiente [°C]	20,3	19,4
Temp. dos gases de exaustão [°C]	482,0	569,7
Perda de carga [mmH <sub>2</sub> O]	23,8	23,8 <sup>(1)</sup>
Concentração de CO <sub>2</sub>	3,2	6,9
Concentração de O <sub>2</sub>	15,3	8,8
Vazão de combustível [Nm <sup>3</sup> /h]	333,2	1.554,1
Diâmetro da chaminé [m]	1,3	1,3

1 - Considerada igual a do forno operando fora de carga, pois é a condição mais crítica de operação.

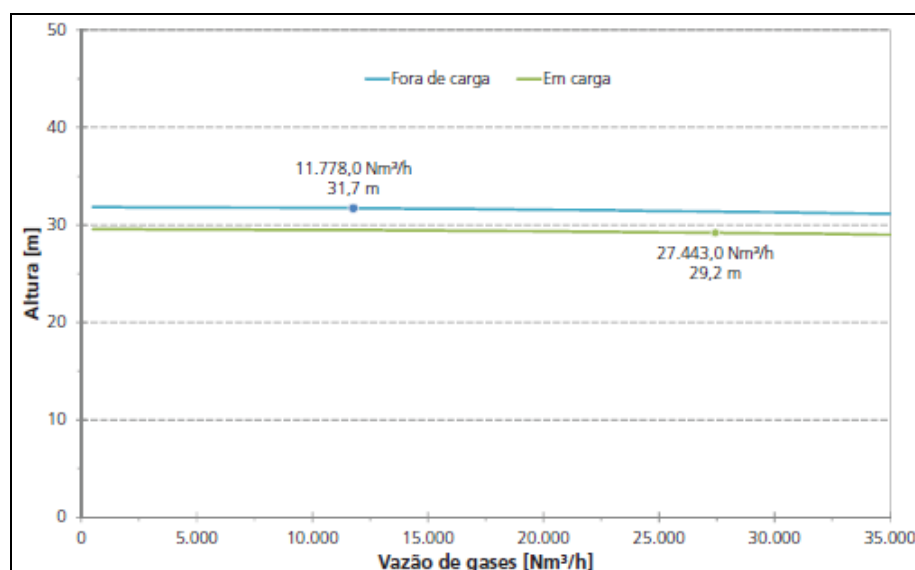


Figura 15 – Altura da chaminé em relação à vazão para tiragem natural

Outra simulação realizada para este sistema considerou a altura da chaminé como função da temperatura dos gases de exaustão. A Figura 16 ilustra o resultado da simulação realizada. Nesta figura os pontos destacados representam as condições operacionais da chaminé durante as medições.

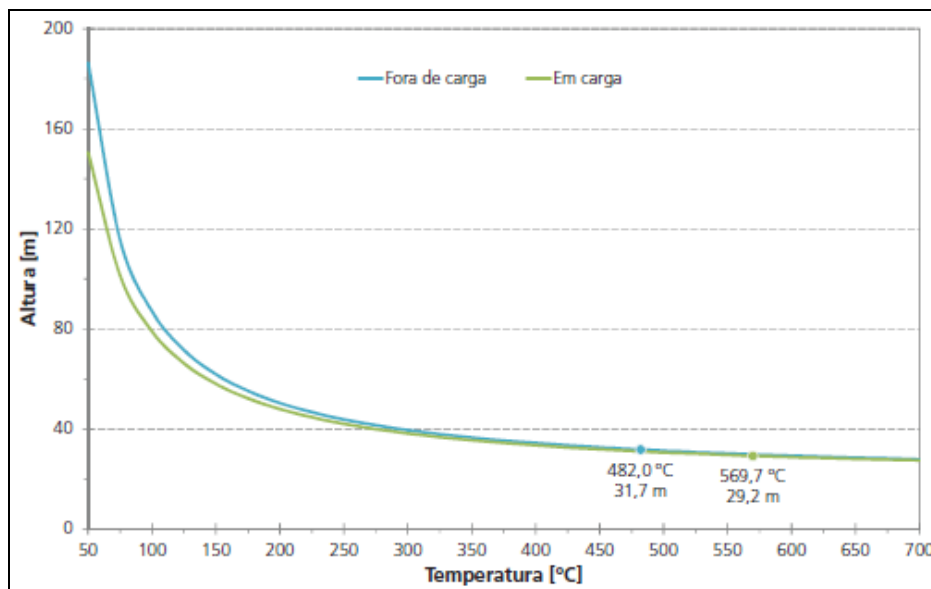


Figura 16 – Altura da chaminé em função de temperatura dos gases para tiragem natural

Na Figura 15 se observa que a altura da chaminé é pouco influenciada pela vazão dos gases de exaustão. Caso ocorra uma variação na capacidade de aquecimento do forno ou uma possível diminuição na vazão de ar de diluição ou que entra pelo pré-aquecedor, a efetividade da chaminé não será prejudicada.

Entretanto, a curva de altura da chaminé em função da temperatura dos gases, da Figura 16, aponta que, em momentos de partida do forno, quando a temperatura dos gases ainda não é suficiente para promover a convecção natural tratada nesta alternativa, é requerida uma altura de chaminé com valores impraticáveis.

A conciliação destas duas simulações resulta na indicação de um sistema de convecção natural dos gases de exaustão, utilizando o ventilador de tiragem de gases atualmente instalado, apenas como apoio para partida do forno.

Como a partida do forno ocorre poucas vezes ao ano, após a implementação da alternativa proposta, pode-se considerar desprezível a potência elétrica média do ventilador de tiragem de gases.

Na Tabela 8 é mostrada a potência elétrica simulada e na Tabela 9 a economia obtida com a implementação da alternativa proposta.

Tabela 8 – Proposta para ventilador de tiragem

<b>Potência elétrica [kW]</b>		
<b>Atual</b>	<b>Proposta</b>	<b>Redução</b>
60,7	0,0	60,7

Tabela 9 – Ganho com ventilador de tiragem

	<b>Situação atual</b>	<b>Situação proposta</b>
Potência [kW]	60,7	0,0
Consumo anual [MWh]	424,9	0,0
Custo anual [R\$]	65.035,19	0,00
<b>Redução anual [MWh]</b>	<b>424,9</b>	

O investimento necessário para execução desta alternativa foi estimado em R\$ 50.000,00 para aquisição e instalação de uma chaminé com aproximadamente 35 metros de altura e 1,3 metros de diâmetro que opere segundo as condições descritas anteriormente. Porém, se for necessário um reforço estrutural na chaminé, pode-se aplicar uma solução intermediária, instalando-se apenas um trecho de chaminé e instalando-se um inversor de frequência no ventilador de tiragem.

## 5.2 Prazos e custos (indicadores econômicos)

O investimento necessário para implementação da melhoria no ventilador do ar de tiragem, é de R\$ 18.447,58 para aquisição do inversor de frequência estipulado. Considera-se que a instalação do inversor demande por dois dias a mão de obra de dois colaboradores, a um custo de R\$ 60,00 a hora por colaborador, totalizando um custo de instalação de R\$ 1.920,00.

O investimento necessário para execução da alteração no ventilador de tiragem, foi estimado em R\$ 50.000,00 para aquisição e instalação de uma chaminé com aproximadamente 35 metros de altura e 1,3 metros de diâmetro que opere segundo as condições descritas anteriormente.

Tabela 10 – Estimativas de retornos

<b>Alternativa</b>	<b>Economia anual (MWh)</b>	<b>Economia anual (R\$)</b>	<b>Investimento (R\$)</b>	<b>Tempo de retorno simples (meses)</b>
Instalação de inversor de frequência no ventilador de combustão	203,0	31.672,06	20.367,58	8
Tiragem natural dos gases de exaustão	424,9	65.035,19	50.000,00	9
<b>Total</b>	<b>627,9</b>	<b>96.707,25</b>	<b>70.367,58</b>	<b>9</b>

O resultado desta análise e os projetos foram apresentados para empresa para análise de investimentos. A empresa analisou o estudo técnico e considerou o investimento atrativo, irá implantá-lo no próximo ano.

## 6 CONCLUSÕES

Um dos maiores consumos de energia elétrica da matriz do Brasil é nas indústrias e com motores elétricos. Uma boa prática é analisar os processos em que estes motores elétricos estão ligados e avaliar seu potencial de ganho. Quando os motores estão acionando alguma máquina de fluido geradora, isto é, bombas e ventiladores, e há a necessidade de variação da vazão, há uma grande oportunidade de eficientização que deve ser analisada. Esta grande oportunidade se deve ao fato de que a potência necessária para acionar as bombas e ventiladores varia ao cubo da variação da vazão, isto é, se em determinado processo, a vazão se reduz à metade, a potência útil se reduz a  $12,5\%=(50\%)^3$ . No projeto desenvolvido e apresentado aqui, se buscou trabalhar em dois ventiladores, um de combustão de um forno e outro de tiragem forçada do mesmo forno, foi possível obter ganhos significativos, com retornos estimados de quase R\$100.000 por ano, com somente investimento menor que isto, ou seja, investimento com tempo de retorno simples menor que um ano.

Para a solução apresentada para o ventilador do ar de combustão, há necessidade de se avaliar uma solução mista: mantendo a válvula na sucção (atual)

e instalando um inversor (proposto). Isto se deve, porque na prática, talvez o ventilador não opere bem com inversor nos extremos de vazão, particularmente, quando necessitar de pouca vazão, nestas condições, o inversor pode apresentar um escorregamento, um menor rendimento e atuar próximo do seu limite, então, talvez tenha-se que trabalhar com inversor numa faixa da vazão e com a válvula no restante.

Para a solução do ventilador de exaustão, considerou-se que o aumento da chaminé seria simples, mas há de se avaliar a necessidade de reforço estrutural, se for necessário reforço, pode-se aumentar a chaminé um pouco e implantar inversor a fim de otimizar consumo, além disso, é possível perceber pela Tabela 6 – Resumo pressão chaminé que a pressão de sucção na base da chaminé pode ser otimizada, podendo ser criado um laço de controle, mantendo-se a pressão de sucção num determinado patamar e variando-se a rotação do ventilador por meio do inversor de frequência. Outra observação importante é que em momentos de partida do forno, quando os gases de exaustão estão numa temperatura menor, é necessário o ventilador de tiragem a plena potência, mas estes eventos são raríssimos, uma vez que o forno é esfriado somente a cada 5 ou 6 anos.

Teve-se uma dificuldade na realização deste trabalho que foi a medição da potência dos ventiladores, pois o medidor estava disponível somente 2 dias, assim, não foi possível uma avaliação mais profunda da potência, com isto, o perfil de consumo foi considerado uma reta, imagina-se que os ganhos podem ser ainda maiores, pois a avaliação e os ganhos aqui estimados foram conservadores, o que demonstra o quão grande este potencial de efficientização neste tipo de equipamento: ventiladores e bombas. Nos processos industriais instalados no Brasil temos uma grande oportunidade de redução do consumo e de obtenção de benefícios econômicos e ambientais.

## **7 REFERÊNCIAS**

AMERICO, Márcio. **Acionamento Eletrônico. Guia Avançado**. Ed. Gráfica da Eletrobrás. Rio de Janeiro, 2004.

ANEEL. **Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL nº 456**, de 29/11/2000, publicada em 30/11/2000.

AQUINO, R. R. B. et al. **Eficientização Energética em Métodos de Controle de Vazão**. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citação em documentos. Rio de Janeiro, 2002b. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011. 11 p.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. Editora Interciência. 3ª edição.

CELESC. **Manual Técnico: Eficiência Energética e Gestão de Energia Elétrica na Indústria**. Companhia Elétrica do Estado de Santa Catarina.

CEPI – PEI – UFBA 44 **Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira**. Anderson Salum

CNI. **Cartilha Eficiência Energética na Indústria**. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

DE SOUZA, FRANCISCO CARLOS NETO. **Bombas Guia Avançado**. Ed. Gráfica da Eletrobrás. Rio de Janeiro, 2004.

DUTRA, João B. de A. **Eficiência energética no controle da vazão em sistemas de bombeamento de água: uso de válvula e controle de velocidade**. Paraíba do Sul: 2005.

EPE, Revista 'Resenha Mensal do Mercado de Energia'. Ano II, Nº16, Janeiro de 2009.

FRANÇA, Junia Lessa et al. **Manual para normalização de publicações técnico-científicas**. 6. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: UFMG, 2003. 230 p.

GARCIA, Agenor Gomes Pinto. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores elétricos no potencial de Conservação de Energia na Indústria**. Rio de Janeiro, 2003.

GUIMARÃES, F. A. et al. **Controle Pid Auto-Ajustável em Ventiladores Industriais Visando a Eficiência Energética**. II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. ABEE. Vitória, 2012.

GUIMARÃES, Felipe de Azevedo et al. **Controle PID Auto-Ajustável em ventiladores industriais visando a eficiência energética**. Vitória: 2007.



HADDAD, Jamil et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Ed. EFEI, Itajubá 2001.

JUNIOR, Percy E. G. **Estudo das tecnologias e aplicações dos inversores de frequência de média tensão**. Vitória: 2005.

KARASSIK, Igor. e CARTER, Roy. **Bombas Centrífugas**. Companhia Editorial Continental. México, 1971.

LIMA, A. S. **Oportunidades de Eficiência Energética em Motores e em Acionadores de Velocidade Ajustáveis (AVA's)**. Fascículo Eficiência Energética. Edição 85. Revista o Setor Elétrico. 2013.

LOCATELLI, Egomar R.. **Motor Elétrico. Guia Avançado**. Ed. Gráfica da Eletrobrás. Rio de Janeiro, 2004.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Ed. Guanabara. Rio de Janeiro, 1987.

MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento: manual prático**. Rio de Janeiro: 2005.

MONACHESI, Marcelo G., **Eficiência Energética em sistemas de bombeamento d'água**. Ed. Eletrobrás, Rio de Janeiro 2005.

NBR 7094. **Máquinas elétricas girantes – Motores de Indução - Especificações**, v.3, 2003.

PANESI, André R. Quinteros. **Fundamentos de Eficiência Energética Industrial, Comercial e Residencial**. São Paulo: 2006.

PFLEIDERER, Carl. **Bombas Centrífugas y Turbocompressores**. Tradução da 4a edição alemã. Editora Labor. Barcelona, 1960.

RASHID, M. H.. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**. Prentice Hall International, Inc., Englewood Cliffs, 1993.

REGIS, R. L. **Eficiência Energética em Processos de Bombeamento D'água**. TCC Graduação em Engenharia Elétrica UFBA. 2010.

SALUM, A. D. **Eficiência Energética em Sistema de Combustão de Caldeira**. TCC Especialização em Engenharia Econômica, UFBA. 2011.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 3ª. Ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

SHINDO Reinaldo, **Manual Técnico - Procel – Motor de Alto Rendimento**. Ed.: Cepel e Eletrobrás, 2002.

SILVA, J. C. **Otimização Energética no Reaquecimento de Tarugos na Laminação de Fio-Máquina**. Dissertação de Mestrado PPGEM. UFRGS. Porto Alegre, 2012.

SPITZER, David William. **Variable Speed Drives – Principles and Applications for Energy Cost Savings**. ISA, 2004.

TAKAMI, Renato, **Fundamento de modelagem matemática e técnicas de simulação aplicados a sistemas ambientais**, 2005.

TASKINEN, Teemu. **Calculation Analysis of Energy Saving Tools for Fan and Pump Applications**. Lappeenranta: 2008.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Redução do custo de Energia Elétrica em estações Elevatórias de Água e Esgoto**, 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu. 1997.

VASCONCELLOS, A. et al. **Eficiência Energética no uso de Conversores em Motores**. Fascículo Eficiência Energética. Edição 86. Revista o Setor Elétrico. 2013.

VENERO, D. M. Oportunidades de Eficiência Energética na Indústria. Centro de Negócios de Eficiência Energética WEG. 2013.

WAID, P e BRUNNER, C. U. **Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems**. Agência Internacional de Energia, 2011.