

## III WORKSHOP BRASIL-JAPÃO em ENERGIA, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

*Com a finalidade de desenvolver tecnologias para satisfazer necessidades imediatas na área de energia, sustentabilidade e meio-ambiente, como o tratamento de efluentes, reuso de resíduos sólidos, combustíveis alternativos e qualidade do ar, este Workshop abre possibilidades interessantes para empresas japonesas e brasileiras, universidades e centros de pesquisas estarem discutindo os temas propostos, propiciando a oportunidades de troca de experiências, a possibilidade de fomentar a realização de novas atividades conjuntas que possam propiciar a integração e desenvolvimento, tanto do Brasil como do Japão, bem como, uma oportunidade para fomentar a realização de novas iniciativas conjuntas para o desenvolvimento de projetos que possam ser benéficos para ambos os países.*



**FAEPEX**

**FAPESP**



**SANASA  
CAMPINAS**

**BR  
PETROBRAS**

**HONDA**  
The Power of Dreams



National University Corporation  
**Gifu University**



Uso Racional e Econômico da Energia dentro de uma Indústria Metalúrgica:  
Oportunidade de troca de eletricidade para gás natural

Autores:

Geraldo Francisco Burani ([burani@iee.usp.br](mailto:burani@iee.usp.br))

Cidar Ramon Oliva Rocha

Paulo Helio Kanayama ([paulo.kanayama@poli.usp.br](mailto:paulo.kanayama@poli.usp.br))

Miguel Edgar Morales Udaeta ([udaeta@pea.usp.br](mailto:udaeta@pea.usp.br))

Octavio Ferreira Affonso ([Octavio@pea.usp.br](mailto:Octavio@pea.usp.br))

Escola Politécnica da USP(EPUSP) e  
Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP (IEE-USP)

### Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um diagnóstico inicial acerca do uso econômico e eficiente do insumo energético em indústrias metalúrgicas que utilizam fornos elétricos. A partir dos fundamentos da gestão energética moderna e caracterização energética da indústria, avalia-se o consumo de eletricidade para apresentar as facilidades na troca de energético para gás natural e os métodos modernos de combustão completa com oxigênio do ar.

Através de cálculos, levando-se em conta as características de produção de uma indústria metalúrgica real, calculou-se o dimensionamento de fornos a gás natural para substituir os fornos elétricos existentes, com margem de crescimento na demanda. Conclui-se no trabalho que a possibilidade é real, mesmo porque poderia se utilizar os métodos modernos de co-geração para um aproveitamento completo do gás que implicaria um investimento adicional para produzir eletricidade através de uma turbina de vapor.

### 1. Introdução

A eficiência energética pode ser apresentada como a relação entre a energia consumida e o volume de produção. Assim, a eficiência energética é tanto melhor quanto menor for a quantidade de energia necessária para a produção de determinado produto.

Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência energética de uma indústria metalúrgica real, tendo como principais análises:

1. Gestão energética e estado da Indústria.
2. Gerenciamento da energia e ampliação da indústria.
3. Troca de energético, da eletricidade para Gás Natural.
4. Introdução da auto-produção e/ou de co-geração de energia

### 2. Gestão energética e caracterização da indústria

A indústria metalúrgica utilizada no estudo localiza-se no interior do estado de São Paulo que utiliza a eletricidade como fonte energética para a fundição de ferro gusa e sucata de ferro.

Os dados de consumo de energia, medidos no período de 15/04/05 a 18/05/05 são:

- Consumo de energia elétrica na Ponta (17h30 às 20h30) = 95,157 MWh
- Consumo de energia elétrica na Fora da Ponta = 953,283 MWh

Portanto:

Consumo mensal = aproximadamente 1000 MWh mês

A demanda contratada, junto à concessionária é de 1.800 kW. Segundo informações da indústria, estima-se que a demanda é distribuída em aproximadamente 1.200 kW para consumo nos fornos elétricos e de 400 a 600 kW para demais cargas.

A tarifa da concessionária sendo praticada é a horo-sazonal verde. Há que se ressaltar que o valor da tarifa de consumo de energia no horário de ponta no segmento horo-sazonal verde é aproximadamente 10 vezes maior que o preço fora do horário de ponta. Por este motivo a indústria gerava energia elétrica no horário de ponta com um gerador diesel, cujo custo médio de geração é de aproximadamente R\$ 300/MWh, aproximadamente 30% da tarifa cobrada pela concessionária no horário entre 17h30 e 20h30.

Após negociação com a concessionária, a indústria passou a receber desconto na tarifa no horário da ponta e por isso o gerador diesel foi desativado. O desconto concedido foi de aproximadamente 10 vezes para 2 vezes a tarifa fora da ponta.

Se considerarmos 18% de ICMS, o gasto mensal é de cerca de R\$ 194 mil, que nos dá um custo aproximado de R\$ 194/MWh.

Pela análise das faturas de energia elétrica, praticamente não há multas por consumo excessivo de reativos. A planta industrial conta com bancos de capacitores que estão bem dimensionados para os níveis de produção atuais.

### 3. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELOS TRANSFORMADORES

Atualmente, a empresa possui instalados 5 transformadores de grande porte (Tab. 1). Os transformadores utilizam cerca de 5% de sua capacidade para consumo próprio. Mesmo sem carga, há consumo de energia devido às perdas joule (calor) e para manter os circuitos magnetizados e prontos para utilização.

O consumo de energia mensal, com todos os transformadores energizados foi estimado em 162 MWh, que representa cerca de 16,2% da energia consumida por toda planta. O gasto financeiro, somente para manter os transformadores energizados, mesmo que não haja produção, é de aproximadamente R\$ 31,5 mil / mês.

Pode-se dizer que os transformadores contribuem com cerca de 225 KW na demanda total da planta. A capacidade total de transformação instalada está sobre dimensionada. Há um total de 4.500 KVA para uma demanda máxima de 1.800 KW. No caso de maior utilização com uma produção intensiva, e se considerarmos um fator de potência de 0,9 e folga de 50% de fator de demanda, uma capacidade de transformação de 3.000 KVA seria suficiente.

Caso a capacidade de transformação da planta fosse de 3.000 KVA, a contribuição na demanda seria de 150 KW e o gasto com energização de transformadores seria de aproximadamente R\$ 20,9 mil, cerca de R\$ 10 mil mensal a menos. Há que se lembrar também que o baixo carregamento dos transformadores abaixa o fator de potência da instalação como um todo. Então um alívio na capacidade de transformação, certamente diminuiria a necessidade de bancos de capacitores também.

### 4. Gerenciamento da energia e ampliação da indústria

O regime de funcionamento normal da planta está dimensionado para funcionar com 4 fornos elétricos:

- 1 forno elétrico de 400 KW para à fusão de 530 Kg/h.
- 1 forno elétrico de 450 KW para à fusão de 530 Kg/h.
- 1 forno elétrico de 500 KW para à fusão de 700 Kg/h
- 1 forno elétrico de 750 Kw para à fusão de 1000 Kg/h (desativado).
- 1 forno elétrico de 1250 KW para à fusão de 1600 kg/h .(sendo instalado)

Um dos fornos de 750 KW foi desativado e em seu lugar estava sendo instalado um com maior capacidade, de 1.250 KW.

De acordo com as curvas de carga analisadas no período específico de 14/04 a 15/05/05, a demanda contratada de 1.800 KW chegou a ser ultrapassada em alguns períodos. Porém, em outros períodos a média de demanda chega ao máximo de 1.500 KW.

Com o aumento da carga instalada, deve-se fazer um estudo de sensibilidade para calcular se é melhor aumentar o valor da demanda contratada ou manter o nível atual e suportar as eventuais ultrapassagens de demanda.

Pela análise das curvas de carga, percebe-se que o regime de produção é contínuo. Quatro ou três fornos elétricos funcionam em rodízio em processo contínuo, enquanto um forno esquenta e funde o metal, outro despeja o ferro fundido para realizar o colado do metal nos moldes de areia, outro já começa a funcionar.

Atualmente, o gerenciamento da energia é parcialmente automatizado. A Yadoya conta com controlador de demanda para evitar a ultrapassagem da demanda contratada de 1.800 kW. Um alarme sonoro faz com que algum forno seja desligado pelos funcionários quando o alarme soa.

Existem no mercado gerenciadores de energia mais sofisticados que permitem monitorar o consumo de energia de cada carga em tempo real, que aumentariam a confiabilidade quanto à ultrapassagem de demanda. Um sistema completo de gerenciamento de energia instalado em uma indústria do porte da Yadoya custaria por volta de R\$ 500 mil.

##### 5. Troca de energético, da eletricidade para Gás Natural

As reservas de gás natural contêm uma mistura de hidrocarbonetos leves sendo composto na sua maior parte pelo metano (CH<sub>4</sub>), e outros em pequena escala denominados de líquidos do gás natural. Este recurso se localiza no subsolo da terra e é procedente da decomposição da matéria orgânica espalhada entre os extratos rochosos. Tal e como é extraído das jazidas, o gás natural é um produto incolor e inodoro, não é tóxico e é mais leve que o ar. O gás natural é uma energia não renovável de origem fóssil, com baixíssimos teores de poluentes como o enxofre e a sua combustão é completa, liberando como produtos da mesma o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor de água, sendo os dois componentes não tóxicos, o que faz do gás natural uma energia ecológica correta e limpa.

Uma vez extraído do subsolo, o gás natural depois de separados os líquidos na UPGN (Unidade Processadora de Gás Natural), deve ser transportado até as zonas de consumo, que podem estar perto ou bastante distante. O transporte, desde as jazidas até estas zonas, é realizado através de tubulações de grandes diâmetros, denominadas gasodutos. Quando o transporte é feito por mar e não é possível construir gasodutos submarinos, o gás é carregado em navios metaneiros. Nestes casos o gás é liquefeito a 160 graus abaixo de zero reduzindo seu volume 600 vezes para poder ser transportado. No porto receptor, o gás é descarregado em plantas ou terminais de armazenamento e regaseificação.

Nos comércios e nas indústrias o gás natural pode ser usado para qualquer processo de geração de frio ou calor, na co-geração de energia térmica e elétrica, e na geração própria de eletricidade. Como combustível, o gás natural é utilizado nos processos e equipamentos industriais que precisam de uma energia limpa, eficaz e altamente confiável, tal com: em cerâmicas, em metalúrgicas, em fabricas de vidro, fornos em geral, fundições, tratamentos térmicos, etc.

Outra aplicação de grande atualidade e com grande futuro é a co-geração. A co-geração com gás natural produz em conjunto energia elétrica (ou mecânica) e calor útil para

fábricas, centros de saúde e hotéis, assim como grandes complexos urbanísticos. O gás natural é também utilizado em grande escala na geração de eletricidade nas centrais térmicas convencionais ou de ciclo combinado.

Cabe destacar que a rodada 7 de licitações da ANP (para áreas de exploração petrolífera), prevista para outubro de 2005, será totalmente dedicada ao Gás Natural, isso por recomendação do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética) e decisão do governo. Recentemente (2005) o Brasil decidiu que cerca de 50% da oferta futura de GN (cerca de 100 milhões de metros cúbicos por dia em 2010) será dedicada a geração elétrica. Isso de fato garante um mercado secundário bem abastecido, principalmente a pequena indústria e comércio (fonte: plano de negócios 2006 – 2010 da Petrobras).

O gás natural é consumido em vários países há mais de 50 anos e cerca de 95% de quase todo o gás canalizado do mundo corresponde a gás natural. Este tipo de gás é a fonte de energia mais limpa que existe, uma vez que não produz resíduos em sua combustão e não polui o meio ambiente. É altamente valorizado em consequência da progressiva conscientização mundial da relação entre energia e meio ambiente.

O gás natural é uma energia que:

- Utiliza-se tal como é extraída da natureza, chegando as instalações do cliente sem nenhuma transformação.
- Permite resolver todas as necessidades energéticas modernas. Em consequência das grandes reservas existentes, possibilita seu desenvolvimento e expansão em diversos campos.
- Dispõe de alto poder calorífico.
- Não é tóxico, pela sua própria composição.
- Preserva o meio ambiente, pois a sua combustão não produz fumaça nem emissões nocivas, ajudando a reduzir a poluição do ambiente urbano.
- É versátil, com muitas aplicações como a lavagem e secagem de roupas, de louças, em ar condicionado, em veículos, na geração de energia elétrica, além das utilizações tradicionais.
- Ao ser queimado minimiza os efeitos na mudança climática já que o metano, se lançado ao ar, tem um efeito estufa 23 vezes maior que o CO<sub>2</sub> (que é resultado da queima do metano).

## 7. Combustão

A importância da combustão deriva de sua característica de reação exotérmica, que depois de iniciada se mantém a uma taxa elevada. Com isso, propicia a formação de uma “diferença de potencial” térmico, originando processos termodinâmicos. Além disso, como um processo termoquímico, é essencial para uma série de processos em escala industrial como metalúrgicas, e domiciliar como a cocção e o aquecimento de água. Na figura 1 pode ser visto o processo genérico de combustão de um gás.

Trata-se de uma reação de oxidação que pode ser expressa genericamente por:

Combustível(GN) + Comburente(O<sub>2</sub> do Ar) => Produtos + Calor

Onde: Combustíveis: em geral hidrocarbonetos (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>); Comburente: Ar e Produtos: água e óxidos (geralmente de carbono).

A combustão é uma reação química em que um oxidante reage rapidamente com um combustível para liberar a energia armazenada como energia térmica, geralmente em forma de gases de alta temperatura. Pequenas quantidades de energia eletromagnética (luz), de energia elétrica (íons e elétrons livres) e de energia mecânica (ruído) também são produzidas durante a combustão. Exceto em aplicações especiais, o oxidante é oxigênio do ar.

Os combustíveis convencionais (hidrocarbonetos) contêm basicamente hidrogênio e carbono, na forma elementar ou de compostos. Sua combustão completa produz principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O). Entretanto, pequenas quantidades de monóxido de carbono (CO) e de componentes parcialmente reagidos (aerossóis gasosos, líquidos ou sólidos) podem ocorrer. A maioria dos combustíveis convencionais contém também pequenas quantidades de enxofre (que são oxidadas a dióxido de enxofre SO<sub>2</sub> ou trióxido de enxofre SO<sub>3</sub> durante a combustão), além de substâncias não combustíveis tais como matéria mineralizada (cinza), água, e gases inertes. No caso específico do CH<sub>4</sub> (gás natural), a combustão resulta em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (água) e óxidos de nitrogênio em mínimas quantidades dependendo da qualidade da combustão (em altíssimas temperaturas).

A taxa da combustão é determinada pelo tipo de combustível e depende:

- da taxa da reação química do combustível com o oxigênio do ar,
- da taxa em que o oxigênio é fornecido ao combustível (mistura do ar e do combustível),
- da temperatura na região da combustão.

A taxa de transferência de calor entre meios é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre eles. Reduzindo a introdução de ar de combustão ao mínimo necessário é possível incrementar a diferença de temperatura entre os gases de exaustão e o fluido ou sólido que deve ser aquecido alcançando temperaturas de até 20000C em alguns casos.

A energia radiante é muito mais efetiva em transferir calor do que as demais porque deriva da própria chama e está diretamente relacionada com a sua temperatura. A taxa de queima na combustão é extremamente sensível à temperatura. Se essa aumenta em 10%, a taxa de combustão mais do que dobra. Todavia, também cresce a produção de NO<sub>x</sub>. Na Fig. 4 se observa o sistema de queima para o gás.

Condicionantes do processo - ar de combustão

- Ar primário – provê uma percentagem de ar para a combustão, mas, mais importante, controla a quantidade de combustível que pode ser queimado (ver Fig. 4).
- Ar secundário – aumenta a eficiência da combustão, promovendo a queima completa do combustível (ver Fig. 4). Os “vazamentos” de ar para dentro de câmaras de combustão provocam a diluição da chama e redução da temperatura dos gases de exaustão, reduzindo a eficiência operativa.
- Ar de excesso – ar fornecido à combustão para garantir que cada molécula do combustível seja completamente envolvida por suficiente ar de combustão.
- Ar de diluição – não participa diretamente da combustão e presta-se basicamente a controlar o fluxo da chaminé e para reduzir a probabilidade de que a umidade presente nos gases de exaustão condense nos sistemas de ventilação. Indiretamente influencia o ar de combustão, a segurança e a eficiência.

## 8. Troca de fornos elétricos por gás natural

Para realizar a analogia entre os fornos elétricos e os fornos a gás se deve ter em conta os seguintes dados:

Um KW de energia elétrica gera 860 Kcal, e em um forno elétrico de fundição o rendimento é dos 60% aproximadamente.

Um metro cúbico de gás natural (COMGAS) gera cerca de 9.000 Kcal. Dependendo da fonte e do processamento esse valor calórico do gás natural pode variar para cima ou para baixo. O rendimento é da ordem de 40%. Quando se utiliza o gás na fundição, temos a vantagem de que há produção de calor residual de 40%, aproximadamente, que é facilmente recuperável para a produção de vapor e/ou outras aplicações. No caso de uma indústria metalúrgica, pode-se aproveitar o calor residual diretamente para realizar o preaquecimento dos fornos, com uma economia da ordem de 10 a 15%.

O investimento para aquisição e instalação de fornos a gás natural foi estimado em R\$ 650 mil, sendo cerca de R\$ 500 mil para aquisição de 4 fornos com capacidade unitária de 1.000 Kg/h de ferro gusa, mais 30% de acréscimo como custo de instalação.

Uma das maiores vantagens da conversão de fornos elétricos para fornos a gás natural é o econômico. O custo de cerca de R\$ 194 mil por mês com energia elétrica pode ser reduzido significativamente. A estimativa é que fornos a gás natural apresentem um gasto mensal da ordem de R\$ 117,7 mil. No caso de ser construído uma rede de distribuição de gás até a planta industrial, o gasto mensal barateia ainda mais, podendo chegar a R\$ 88 mil mensais. No cálculo, dos valores apresentados na tabela 5, foi considerado a utilização de tecnologias modernas de queimadores para combustão completa do gás natural com oxigênio do ar.

## 9. Características e funcionamento dos fornos a gás natural

A seguir, descreve-se o funcionamento de um forno tipo basculante a gás natural (ver figura 5). Onde o conceito fundamental é o aproveitamento eficiente na combustão do oxigênio diretamente da natureza (o ar contém na sua maior parte O<sub>2</sub>),.

Os fornos para fusão de metais funcionam fazendo uma combustão completa entre o ar e o gás natural. A quantidade de ar a ser entregue para os fornos é calculada pela quantidade de gás natural. Mas para garantir uma combustão perfeita e garantir o calor de processo para a fusão do metal, é necessário injetar uma quantidade de ar e gás em excesso, de 5 a 10%. Esse excesso é necessário devido a que o nitrogênio que se encontra misturado com o ar também absorve calor no processo de combustão, provocando uma pequena queda de calor que será compensada com o excesso acima mencionado. Deve ficar claro que esse ar em excesso garante que a combustão seja completa e o calor requerido para a fusão do metal seja sempre constante.

Objetivamente, afirma-se que os fornos de gás natural oferecem baixa manutenção, podendo funcionar ininterruptamente. São de fácil manipulação e controle de operação. Os fornos atuais empregam modernos materiais, de grande qualidade e conceitos de alta tecnologia.

### Construção

O forno é fabricado externamente por uma estrutura metálica em chapas e perfis de aço laminado com tratamento especial anticorrosivo, de grande robustez e leveza, com pintura epóxi.

O comando de acionamento do sistema de giro do forno pode situar-se, em função das exigências do usuário, no painel de controle geral, ou também no mesmo bastidor próximo ao ponto de escoamento. Não é necessário nenhum tipo de obra civil para colocação do forno (ver figura 5).

Os injetores de gás natural são projetados e dimensionados pelos fabricantes para garantir a combustão completa dos gases (gás natural e ar).

#### Isolamento

O isolamento dos fornos contém fibras minerais e cerâmicas de baixa massa térmica e grande poder calorífico, dispostos em camadas para reduzir as perdas de calor.

#### Controle do processo

O controle da fusão é realizado por meio de microprocessador eletrônico, com visualizador digital de temperaturas. Todas as leituras são digitais. Tem-se sempre uma visão continuada da temperatura do metal fundido e da câmara de combustão e das horas de trabalho do cadinho, e também conta-se com ativação de um alarme ao se aproximar o momento para a manutenção preventiva.

A presença de alarmes programáveis dispensa atenção constante no sistema.

#### Introdução da co-geração

Além do processo de fundição, os fornos a gás natural permitem recuperar o calor gerado pelos fornos para gerar energia elétrica e gerar calor de processo para esquentar a areia (dentro do processo industrial). O sistema de co-geração funciona da seguinte forma:

- o O calor produzido pelos fornos é transportado a uma temperatura de 800°C até uma caldeira onde se produz vapor a pressão e alta temperatura;

- o Esse vapor é dirigido a alta pressão para uma turbina de vapor onde transformará essa energia em energia mecânica e depois em energia elétrica com uma potência de 500 kW a 220 V.

- o Essa energia poderá ter usos nos escritórios, cozinha e outros;

- o O calor residual da turbina de vapor a menor pressão e menor temperatura pode ser entregue para aquecer por ex. a areia dos moldes dentro da cadeia produtiva.

Para o caso de co-geração de toda a indústria pode-se considerar o custo de investimento de 300 US\$/kW para instalação de uma planta de ciclo combinado a gás natural. O custo total estimado é de R\$ 1,5 milhão.

#### Introdução da autoprodução / co-geração de energia elétrica com gás natural

Um sistema de autoprodução de eletricidade para substituir o fornecimento de energia da concessionária pelo uso de gás natural pode ser feito com um sistema de co-geração para gerar toda a energia elétrica da indústria e também se usar o vapor de processo para uso produtivo na indústria. A diferença com sistema de co-geração anterior é que a geração de energia é produzida por micro-turbina de gás natural ou por motor de combustão interna. Vale lembrar que o custo da energia vendido pela concessionária de energia no horário de ponta na tarifa verde, sem desconto é de aproximadamente R\$ 1.000 / MWh. Fora da ponta, a tarifa é de R\$ 120 / MWh.

Os custos estimados para cogeração de energia em média são de 1500 US\$/kW no caso de micro-turbinas. Isso levaria a gastos de aproximadamente 120 a 200 US\$/MWh, dependendo da forma de uso do calor.



Já para a cogeração com motores a combustão interna (MCI) teríamos custos de aproximadamente 150 US\$/MWh, num modelo take-or-pay.

O custo da energia elétrica a partir de gerador diesel é de aproximadamente R\$ 300 / MWh.

Embora o custo da energia a partir do gás natural seja vantajoso no horário de ponta, o custo de investimento para 2.000 KW , contemplando a instalação de equipamentos auxiliares, obras civis e custo dos motores é de cerca de R\$ 2 milhões.

Bibliografia:

Site da COMGÁS ([www.comgas.com.br](http://www.comgas.com.br))

Site da ANP ([www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br))