

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO  
TÉCNICO-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DA  
ELETROTERMIA POR GÁS NATURAL

PAULO ROBERTO CARNEIRO

2007

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICO-  
ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DA ELETROTERMIA POR GÁS  
NATURAL**

Paulo Roberto Carneiro

São Paulo, junho de 2007

1610867

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICO-  
ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DA ELETROTERMIA POR GÁS  
NATURAL**

Aluno: Paulo Roberto Carneiro

Orientador: Profº Dr. José Aquiles Baesso Grimoní

Coordenador: Profº Dr. Luiz Cláudio Ribeiro Galvão

São Paulo, junho de 2007

## **Resumo**

Fornos elétricos exigem altas potências de operação devido ao seu princípio de funcionamento (efeito Joule, indução e arco elétrico) para a geração de calor, apesar de possuírem rendimento elevado e maiores possibilidades de controle (pelo menos mais simples que outros), são de gasto energético elevado para a produção de calor. Mas com os baixos preços da energia elétrica, desde a década de 1980 foi incentivado o uso desse tipo de forno. Atualmente, com a crise no setor energético, a disponibilidade de energia elétrica já não é abundante como a alguns anos atrás, fato que nos mostra a necessidade do uso de outros tipos de combustíveis, como, por exemplo, as fontes térmicas, na qual o gás natural se mostra a fonte de energia mais promissora. Sabendo-se disso, pode-se propor uma metodologia para que ocorra uma substituição dos fornos elétricos, quando possível, para fornos a gás natural. Este é o foco deste estudo, que deve servir como estudo piloto para substituições em geral, apesar de ser feita a avaliação na indústria metalúrgica, onde será feito um estudo teórico para a viabilidade técnica e econômica da substituição. Além disso, serão desenvolvidos os requisitos necessários para a construção de um sistema com inteligência artificial para que a avaliação da substituição seja feita através de regras heurísticas (sistema especialista), tendo como base o estudo anterior. Tal sistema especialista é um sistema computacional dedicado a análise do problema da substituição, onde poderão ser feitas alterações de parâmetros de acordo com o local (no caso, uma planta industrial específica) onde pode vir a ser feita a substituição da eletrotermia.

## **Abstract**

Electric Furnaces require high power levels to work, due to it working function principle (Joule Effect, Induction and electric arc) to generate heat, in spite of have high efficiency and larger control possibilities, they spend lots of energy to this type of process. But with electric energy's low prices since 80's, this type of use was promoted. Nowadays, with Brazilian energy crisis, the electric energy is not available like some years ago, what is something that show us a necessity of use other types of energy sources, like thermal sources, where natural gas seems the most promissory one. Knowing this, is possible propose a method to substitute electric furnaces to natural gas furnaces, when it's possible. This is the study focus, which have be able to be a prototype study to substitutions in any kind of industry, despite this study to be done in metallurgical industry, where will be detected technical-economical viability of substitution. Furthermore, will be developed the rules required for a expert system which use heuristic ones. Based in the previous study. This expert system is a computer system that will solve the problem of substitution, where will be possible do changes in the parameters according to the place where this technique will be applied.

## **Agradecimentos**

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Prof José Aquiles Baesso Grimoní pela orientação e paciência.

Aos Profs Miguel Edgar Morales Udaeta e Luiz Cláudio Ribeiro Galvão pelo auxílio e pelas valiosas dicas no decorrer do trabalho.

Ao Dr. Paulo Hélio Kanayama pelo apoio e pela disponibilidade para esclarecimentos e auxílio.

A toda equipe do PIR pelo apoio.

Aos meus amigos professores e alunos da Casa de Cultura do Sapopemba por todo o conhecimento compartilhado ao longo desses anos.

Aos colegas do PEA pelo auxílio nas horas de necessidade de pela diversão nas horas boas, os quais a enumeração dos nomes seria injusta e tomaria diversas páginas.

Especialmente a minha família, por me apoiar todos os anos da minha vida e possibilitar que eu tivesse concluído o curso enquanto para tantos somente o ingresso na Universidade é um sonho distante.

## **Índice**

<b>1. Introdução .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Definições.....</b>	<b>9</b>
2.1. Qualidade da Energia Elétrica.....	10
2.2. Tarifação da Energia Elétrica.....	14
2.2.1. Classes Tarifárias .....	14
2.2.2. Tarifação Convencional.....	15
2.2.3. Tarifação Horo-Sazonal Verde .....	17
2.2.4. Tarifação Horo-Sazonal Azul.....	19
2.3. Tarifação do Gás Natural .....	20
2.4. Eletrotermia.....	21
2.5. Funcionamento dos fornos elétricos .....	23
2.5.1. Fornos à Resistência .....	23
2.5.2. Fornos de Indução.....	26
2.5.3. Fornos a arco .....	28
2.6. Fornos a gás natural .....	29
2.6.1. Combustão no forno a gás .....	29
Condicionantes do processo - ar de combustão.....	32
2.6.2. Operação do forno a gás.....	33
2.7. Ar propanado .....	35
2.8. Inteligência Artificial e Sistemas especialistas .....	35
2.8.1. Inteligência Artificial.....	36
2.8.2. Sistemas Especialistas.....	40
<b>3. Metodologia do Trabalho .....</b>	<b>40</b>
<b>4. Resultados do trabalho .....</b>	<b>41</b>

4.1. Esboço da metodologia de substituição .....	41
4.2. Escolha do setor e justificativa .....	43
4.3. Potenciais Benefícios .....	45
4.4. Considerações sobre a Planta Estudada .....	45
4.5. Considerações técnicas sobre a substituição.....	46
4.6. Análise da Viabilidade .....	47
4.6.1. Metodologia de Cálculo .....	47
4.6.2. Cálculo para fornos novos e forno elétrico com 5 anos (caso base).....	53
4.6.3. Análise do caso de rendimento 35% para o forno a gás .....	59
4.6.4. Análise do Caso de Rendimento 70% para o Forno elétrico .....	61
4.6.5. Análise do caso com Rendimento de 70% para o Forno Elétrico e 35% para o forno a Gás Natural (Caso desfavorável) .....	63
4.6.6. Análise do caso de aumento de 10% na tarifa de gás.....	65
4.6.7. Análise do caso de aumento de 20% na tarifa de gás.....	66
4.6.8. Análise do caso limite .....	68
4.7. Discussão dos resultados .....	69
4.8. Sistema Especialista para Avaliação da Substituição da Eletrotermia por Gás Natural .....	71
<b>5. Análise da metodologia.....</b>	<b>74</b>
<b>6. Conclusões e Sugestões .....</b>	<b>76</b>
<b>7. Bibliografia .....</b>	<b>76</b>

## **1. Introdução**

Na década de 1980, devido aos grandes investimentos feitos no setor elétrico, o consumo de eletricidade no Brasil foi incentivado, para que os investimentos tivessem um retorno financeiro mais rápido. Com isso, foi criada no Brasil uma certa dependência da energia elétrica em detrimento de outros combustíveis da matriz energética. Sendo assim, os usos finais de energia elétrica tornaram-se economicamente mais viáveis do que outros usos tradicionais de energia em muitos casos.

No caso dos fornos elétricos, estes que exigem altas potências de operação devido ao seu princípio de funcionamento (efeito Joule, indução e arco elétrico) para a geração de calor, apesar de possuírem rendimento elevado e maiores possibilidades de controle (pelo menos mais simples que outros), são de gasto energético maior que fontes térmicas tradicionais. Mas com os baixos preços da energia elétrica, desde a década de 1980 foi incentivado o uso desse tipo de forno.

Atualmente, com a falta de investimentos públicos no setor elétrico desde a década de 1990, onde as grandes obras começaram a rarear, a privatização de certas partes do setor elétrico, que causou instabilidade no mercado de energia, não possibilitando, no curto prazo, a confiabilidade suficiente para que investidores privados fizessem investimentos e o crescente consumo de energia elétrica no país fizeram com que a necessidade de geração aumentasse até o limite do sistema elétrico, fato que em 2001 foi responsável pelo racionamento de energia elétrica, que proporcionou uma

certa mudança de mentalidade da população e dos especialistas com relação ao papel da energia elétrica na matriz energética brasileira. Com isso, intensificaram-se os estudos sobre diversificação da matriz energética.

Foi proposto pelo governo federal, então, a construção de usinas termelétricas para suprir rapidamente a falta de eletricidade, programa esse que resultou na construção de umas poucas usinas. Além disso, os investimentos no setor elétrico, ainda hoje (2006) não foram muito intensificados e caminhamos para uma nova crise energética.

Daí surge a motivação desse trabalho. Uma das possibilidades para a mitigação dos problemas no setor é a substituição de alguns usos finais de energia elétrica por outras fontes energéticas. No caso deste estudo, a substituição de fornos elétricos por fornos a gás natural, que apesar dos recentes problemas no comércio deste produto com a Bolívia ainda aparece como uma alternativa viável e ecologicamente mais correta do que as fontes térmicas convencionais, como óleo e carvão.

Além disso, também será analisado o caso da geração de energia elétrica por fontes térmicas, como proposto pelo plano de emergência de 2001 com o uso do gás natural diretamente como combustível.

Vale ressaltar também que, apesar desse estudo ser desenvolvido com base no gás natural e alguns aspectos químicos serem específicos dele, pretende-se que a metodologia proposta seja válida para o caso de outras fontes térmicas, como, por exemplo, os biocombustíveis.

## **2. Definições**

## **2.1. Qualidade da Energia Elétrica**

Não existe definição padrão para o termo, mas pode-se tratar o tema como a tentativa de minimização de distúrbios em parâmetros da rede elétrica como por exemplo:magnitude da tensão e corrente elétricas e distorções em suas formas de onda, freqüência, flicker, Interrupções curtas ou longas, ruídos e outros. Serão detalhadas a seguir tais caracterizações.

1. Interrupções Transitórias: Perda de potência elétrica total durante 0,5 ou mais ciclos de tensão.
2. Variações de tensão de curta duração: Mudanças no valor eficaz da tensão para valores acima(salto de tensão ou swell) ou abaixo(mergulho de tensão ou sag) do valor eficaz (RMS) .Ambos são caracterizados por sua duração de 0,5 ciclo a 1 minuto.
3. Variações de tensão de longa duração: Variações que ocorrem num tempo superior a 1 minuto.
4. Transitórios: Variações na forma de onda por um período curto (microsssegundos), mas com conteúdo substancial de energia.Uma categoria especial de transitorio são os surtos de retorno, gerados por descargas elétricas nas quais há grande aumento no valor de pico da tensão(as correntes transportadas por esses surtos podem variar de 10 a 500kA, induzindo tensões altas em condutores elétricos).
5. Distúrbios oscilatórios: Distúrbios caracterizados por terem duração menor que 30 ciclos, podendo ser de alta freqüência (até 5KHz) e de baixa freqüência (menor que 300Hz).

6. Flicker (Cintilação): É definido como a percepção visual das variações de fluxo luminoso devidas à variação do valor eficaz de tensão em torno do valor nominal. Tais repetições são rápidas e de baixa freqüência (até 30 Hz). Pode ser caracterizado como de curta duração (Pst) ou de longa duração (Plt).
7. Corte (Notch): Distorção na forma de onda devida à curto-circuitos momentâneos na comutação de chaves estáticas.
8. Ruído: Perturbações aleatórias na onda de tensão com freqüências entre 0 e 2MHz. Podem ser originadas nas cargas de consumidores ou em defeitos do sistema.
9. Flicker: Cintilação. É a sensação visual da variação do fluxo de elétrons (que implica numa variação de luminosidade) numa lâmpada. Tal variação decorre de variações no nível de tensão para mais ou menos do que o valor eficaz. Variações perceptíveis ao olho humano são da ordem de 1% de variação da tensão em relação a seu valor eficaz. Para análises quantitativas, existe um parâmetro chamado severidade de cintilação. A análise de tal parâmetro se divide em dois grupos:  
Pst (severidade de curta duração): Severidade da cintilação associada à flutuação de tensão verificada num período de 10 minutos.  
Plt (severidade de longa duração): Severidade da cintilação associada à flutuação de tensão verificada num período de 2 horas.
10. Harmônicas: Dado um padrão de onda senoidal, como o adotado na rede elétrica, podemos designar as harmônicas do sistema como

desvios em relação à esse padrão. Um sinal qualquer pode ser descrito através da série de Fourier, nas formas seguintes:

1.Trigonométrica.

$$s(t) = a_0 \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cdot \cos(k\omega_0 t) + b_k \cdot \sin(k\omega_0 t)] \quad (1)$$

$$\text{com } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Onde os  $a_k$  e  $b_k$  são constantes reais,  $T_0$  é o período da onda e  $\omega_0$  é a freqüência.

2.Trigonométrica Polar.

$$s(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2)$$

$$\text{com } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Onde os  $A_k$  são constantes reais, os  $\theta_k$  são defasagens,  $T_0$  é o período da onda e  $\omega_0$  é a freqüência.

3.Forma complexa

$$s(t) = \sum c_k \cdot e^{jk\omega_0 t} \quad (3)$$

$$\text{com } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Onde os  $c_k$  são freqüências complexas,  $T_0$  é o período da onda e  $\omega_0$  é a freqüência.

Nos sistemas de potência, geralmente a forma utilizada é a Trigonométrica Polar.

Existe uma freqüência no sinal que é chamada freqüência fundamental, que no caso da rede elétrica no Brasil é 60Hz (em alguns outros países é 50Hz). Tal freqüência é a componente desejada de tensão, para a qual os equipamentos elétricos foram projetados para funcionar. Mas devido à distúrbios na rede podem surgir componentes com freqüências múltiplas da fundamental. Tais componentes são chamadas de harmônicas. Na rede elétrica brasileira, tais freqüências são 120Hz, 180Hz, 240Hz, 300Hz e assim sucessivamente. O fator multiplicativo (k na equação) é chamado ordem da harmônica. A ordem, por exemplo, da harmônica de freqüência 300Hz é 5 ( $5 \times 60$ ).

Tais componentes podem provocar danos aos equipamentos ou mal funcionamento. Por isso, é conveniente a medida do conteúdo energético de tais componentes. A medida usada para tal é o THD (Distorção Harmônica Total), onde o conteúdo das harmônicas secundárias é comparado com o da fundamental. A expressão do THD é:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum (U_h)^2}}{U_1} \times 100\%, \quad (4)$$

onde  $U_1$  é o valor eficaz da fundamental e  $U_h$  é o valor eficaz da h-ésima harmônica (tanto de tensão como de corrente).

## **2.2. Tarifação da Energia Elétrica**

### **2.2.1. Classes Tarifárias**

No Brasil, são diferenciadas as formas de cobrança do consumo de energia elétrica através do nível de tensão, que enquadram os consumidores em dois tipos básicos, de alta tensão (tipo A) e de baixa tensão (tipo B).

Nesses tipos básicos existem subdivisões que estão mostradas nas tabelas 1 e 2 abaixo:

Classe	Demand
A1	Maior que 230kV
A2	88kV a 138KV
A3	69kV
A3a	30kV a 44kV
A4	2,3kv a 25kV
AS	Subterrâneo

Tabela1: Sub-classes tarifárias para alta tensão

Classe	Demand
B1	Residencial, residencial de baixa renda
B2	Rural, Cooperativa de eletrificação Rural, Irrigação.

B3	Demais classes
B4	Iluminação pública

Tabela2: Sub-classes tarifárias para baixa tensão

Consumidores da classe B possuem uma tarifação chamada Monômia, ou seja, só pagam pela energia elétrica consumida. Já os consumidores da classe A possuem tarifa binômia, e pagam tanto pela energia elétrica consumida quanto pela demanda contratada. Existem três tipos de tarifação binômia:

### **2.2.2. Tarifação Convencional**

Nesse tipo de tarifação, existe um contrato feito com a concessionária de energia no qual é estabelecido um valor de demanda que o consumidor utilizará ou pretende utilizar (demanda contratada). Tal valor não é alterado pela hora do dia (horário de ponta ou fora de ponta), nem pelo período do ano (seco ou úmido). Nesse tipo de tarifação podem ser enquadrados consumidores dos sub-grupos A3a, A4 e AS, se a demanda contratada for maior que 30kW, menor que 300kW por mês e se não houver, por três meses seguidos ou seis alternados, registros de demanda superior a 300kW. Nesse caso, o consumidor será alocado na tarifa horo-sazonal azul, podendo posteriormente optar pela verde. O cálculo da tarifa convencional é a soma de três fatores que são:

$$P_{consumo} = T_c * C_M \quad (5)$$

Onde:

$P_{consumo}$ : Custo pelo consumo

$T_c$ : Tarifa de Consumo

$C_M$ : Consumo Medido

$$P_{demanda} = T_d * D_c \quad (6)$$

Onde:

$P_{demanda}$ : Custo pela demanda

$T_d$ : Tarifa de Demanda

$D_c$ : Demanda Contratada

$$P_{ultrapassagem} = T_u * (D_M - D_c) \quad (7)$$

Onde:

$P_{ultrapassagem}$ : Custo de Ultrapassagem

$T_u$ : Tarifa de Ultrapassagem

Com essas três parcelas têm-se a soma:

$$P_{total} = P_{consumo} + P_{demanda} + P_{ultrapassagem} \quad (8)$$

Devem ser observados alguns detalhes em relação às equações. Um deles é o de que a parcela de demanda deverá ser paga integralmente mesmo se o valor demandado não for consumido. Outro é que a parcela de

ultrapassagem será cobrada se a potência consumida for, no mínimo, 10% maior que a contratada. Tal tarifa é três vezes maior do que a tarifa de demanda.

### **2.2.3. Tarifação Horo-Sazonal Verde**

Este tipo de tarifação é opcional aos consumidores dos sub-grupos A3a, A4 e AS. Assim como na tarifação convencional, é estabelecido um valor de demanda, mas este pode ter dois valores distintos (no horário de ponta e fora dele). Para o consumidor se enquadrar nessa tarifa deve atender aos requisitos da tarifa convencional.

Para o cálculo da tarifa devemos considerar três parcelas:

$$P_{consumo} = (T_p * C_p) + (T_{fp} * C_{fp}) \quad (9)$$

Onde:

$P_{consumo}$ : Custo pelo Consumo

$T_p$ : Tarifa de Consumo na ponta

$C_p$ : Consumo Medido na ponta

$T_{fp}$ : Tarifa de Consumo fora da ponta

$C_{fp}$ : Consumo Medido fora da ponta

$$P_{demanda} = T_d * D_c \quad (10)$$

Onde:

$P_{\text{demanda}}$ : Custo pela demanda

$T_d$ : Tarifa de Demanda

$D_c$ : Demanda Contratada

$$P_{\text{ultrapassagem}} = T_u * (D_M - D_c) \quad (11)$$

Onde:

$P_{\text{ultrapassagem}}$ : Custo de Ultrapassagem

$T_u$ : Tarifa de Ultrapassagem

$D_M$ : Demanda Medida

Com essas três parcelas têm-se a soma:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{consumo}} + P_{\text{demanda}} + P_{\text{ultrapassagem}} \quad (12)$$

Assim como na tarifa convencional, a demanda não pode ultrapassar 10% do valor máximo contratado. Outro detalhe é que as tarifas de consumo na ponta e fora da ponta são mais caras no período seco (maio à novembro) do que no período úmido.

## **2.2.4. Tarifação Horo-Sazonal Azul**

Este tipo de tarifação é obrigatório para consumidores dos sub-grupos A1, A2 e A3. Neste tipo de tarifação é obrigatório o estabelecimento de uma demanda a ser contratada no horário de ponta e um demanda contratada fora do horário de ponta. Tais valores podem ser diferentes para o período seco e para o período úmido. Como nas outras estruturas, a tarifa é composta por três parcelas:

$$P_{consumo} = (T_p * C_p) + (T_{fp} * C_{fp}) \quad (13)$$

Onde:

$P_{consumo}$ : Custo pelo Consumo

$T_p$ : Tarifa de Consumo na ponta

$C_p$ : Consumo Medido na ponta

$T_{fp}$ : Tarifa de Consumo fora da ponta

$C_{fp}$ : Consumo Medido fora da ponta

$$P_{consumo} = (T_{dp} * D_{cp}) + (T_{dfp} * D_{cfp}) \quad (14)$$

Onde:

$P_{consumo}$ : Custo pela Demanda

$T_{dp}$ : Tarifa de Demanda na ponta

$D_{cp}$ : Demanda Contratada na ponta

$T_{dfp}$ : Tarifa de Demanda fora da ponta

D<sub>cfp</sub>: Demanda Contratada fora da ponta

$$P_{ultrapassagem} = T_{up} * (D_{Mp} - D_{cp}) + T_{ufp} * (D_{Mfp} - D_{cfp}) \quad (15)$$

Onde:

P<sub>ultrapassagem</sub>: Custo de Ultrapassagem

T<sub>up</sub>: Tarifa de Ultrapassagem na ponta

T<sub>ufp</sub>: Tarifa de Ultrapassagem fora da ponta

D<sub>Mp</sub>: Demanda Medida na ponta

D<sub>Mfp</sub>: Demanda Medida fora da ponta

Com isso, têm-se a soma:

$$P_{total} = P_{consumo} + P_{demanda} + P_{ultrapassagem} \quad (16)$$

A parcela de ultrapassagem, nesse caso, é cobrada quando a demanda medida ultrapassa a contratada em 5% nos sub-grupos A1, A2 e A3 e 10% para os demais grupos. Tais tarifas são diferenciadas, sendo mais caras no horário de ponta.

### **2.3. Tarifação do Gás Natural**

A tarifação do Gás Natural é um pouco mais simples do que da energia elétrica, já que a extração desse insumo não depende da época do ano. Sendo assim, existem apenas divisões de consumidores, onde o preço do m<sup>3</sup> muda, de acordo com o uso. Tais classes são (no caso da Comgás):

1. Co-geração
2. Termoelétricas

3. Interruptível
4. Matéria-Prima
5. Gás Natural Canalizado
6. Residencial
7. Comercial
8. Industrial

Para o cálculo do consumo na maior parte das categorias, é utilizada a seguinte equação:

$$I = F + (CM * V) \quad (17)$$

Onde:

I: Importe

F: Valor do encargo Fixo

CM: Consumo mensal, medido em m<sup>3</sup>

V: Valor do encargo variável.

Além disso, para cada faixa de consumo, existe um valor diferente para os encargos fixos e variáveis, onde quem consome mais paga menos pelo m<sup>3</sup> de gás.

## **2.4. Eletrotermia**

Processos eletrotérmicos são caracterizados pela ação da corrente elétrica unicamente para a produção de calor. Tal geração se dá pela relação entre corrente elétrica e potência elétrica dissipada numa carga.

$$P = R * I^2 \quad (18)$$

Onde P é a potência dissipada, R é a resistência do equipamento e i é a corrente elétrica.

A eletrotermia é realizada por fornos elétricos, que podem ser dos seguintes tipos;

- Fornos a arco, nos quais o calor é produzido pela passagem da corrente elétrica num espaço entre dois eletrodos, ou entre a extremidade de um eletrodo e a carga.
- Fornos à Resistência, onde o calor é produzido pela passagem de corrente elétrica através de uma carga ou de resistências que irradiam o calor para a carga.
- Fornos de indução, onde o calor é produzido através de um enrolamento, também por efeito Joule.
- Fornos mistos que são misturas dos tipos citados acima.
- Fornos a Plasma, onde o calor é produzido por tochas de plasma.

Também existem alguns outros tipos, como fornos de aquecimento dielétrico, por raios infravermelhos, por feixes de elétrons, por ondas ultra-sônicas, por laser e outros ainda.

A utilização de fornos elétricos tem algumas vantagens em relação a fornos combustíveis. Dentre essas podemos citar:

- As temperaturas alcançadas com fornos elétricos são maiores e mais uniformes.
- Geralmente requer menos espaço físico.
- Certos produtos só podem ser obtidos com forno elétrico.
- O rendimento do forno elétrico é significativamente maior.

Alguns exemplos de processos eletrotérmicos são:

- Fusão e Tratamento térmico de materiais e de leitos metálicos
- Cozedura de cerâmica e de refratários
- Tratamento de vidro
- Reaquecimento elétrico
- Soldadura elétrica

Dentre esses alguns são exclusivamente executáveis através do uso de energia elétrica, mas outros também podem ser obtidos com fornos à combustível. Deve ser verificada, nesse caso, a viabilidade econômica e ambiental.

## **2.5. Funcionamento dos fornos elétricos**

### **2.5.1. Fornos à Resistência**

**Fornos à resistência de aquecimento Direto:** Onde o material trabalhado é posicionado entre os eletrodos e submetido à mesma corrente destes. São de aplicação específica.

**Fornos à resistência de aquecimento Indireto:** Neste tipo de forno, o material está confinado numa câmara termicamente isolada e o calor é transferido através de irradiação, convecção e condução. São o tipo mais comum de forno à resistência, utilizado em secagem de produtos farmacêuticos, vulcanização, secagem de produtos alimentícios, fusão de materiais, tratamento térmico e outros.

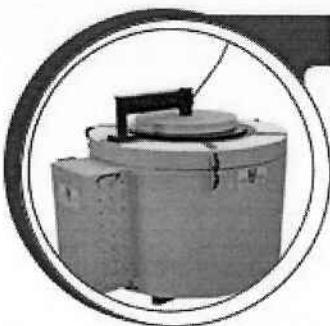


Fig1. Forno a resistência com cadiño

Os parâmetros considerados num forno desse tipo são:

1. Carga Específica Superficial, que depende do material e mostra a transferência de potência da resistência para a carga em função da secção do fio (geralmente varia de 0,5 a 4,5 W/cm<sup>2</sup>).
2. Potência do forno, que depende da operação e da carga de trabalho. É dada pela equação:

$$P_f = \frac{E * P_m}{\eta * T} \quad (19)$$

Onde:

P<sub>f</sub>: Potência do Forno, em kW

η: Rendimento do forno (varia de 0,6 a 0,8).

T: tempo desejado para o material atingir a sua temperatura de trabalho, em horas.

P<sub>m</sub>: Massa do material a ser trabalhado, em t.

E: Energia consumida no processo desejado, em kWh/t.

3. Diâmetro do fio resistor: Determinado pela equação abaixo

$$D_f = 34,4 * \sqrt[3]{\frac{\rho}{P_l} * \left( \frac{P_{ff}}{N_p * V} \right)^2} \quad (20)$$

Onde:

D<sub>f</sub>: Diâmetro do fio

ρ: Resistividade do Material do resistor, em Ω.mm<sup>2</sup>/m

P<sub>l</sub>: Carga específica superficial do resistor, em W/cm<sup>2</sup>.

V: Tensão do suprimento, em V

P<sub>ff</sub>: Potência por fase do forno, em kW.

N<sub>p</sub>: Número de circuitos resistores em paralelo.

Na tabela abaixo, são mostrados os valores de energia necessários ao processo de fusão de alguns metais e seus respectivos pontos de fusão:

Material	Energia Requerida (kWh/t)	Temperatura de Fusão (°C)
Aço	295	1500
Ferro Gusa	345	1400
Alumínio	300	700
Cobre	120	1000
Prata	60	900
Níquel	237	1400

4. Comprimento do fio resistor: Dado pela equação abaixo.

$$L_f = \frac{R_r}{R_{\Omega/m}} \quad (21)$$

$R_r$ : resistência do fio resistor, em  $\Omega$

$R_{\Omega/m}$ : Resistência, por unidade, do fio resistor, em  $\Omega/m$ .

### **2.5.2. Fornos de Indução**

São fornos que se utilizam de correntes induzidas (Foucault) para produzirem ou manterem a fusão de metais em recipientes termicamente isolados por material refratário e envolvido numa bobina indutora.

Funcionam como um transformador com o secundário curto-circuitado (no caso a carga de trabalho), com cabos de cobre refrigerados internamente por água. Tem como vantagem a possibilidade de operação com cargas de potência elevada, sem risco de interferências no processo químico.

Para diferentes geometrias do circuito e do material processado o forno tem diferentes rendimentos e diferentes freqüências de operação são necessárias em sua operação. As tensões aplicadas variam de 60 a 600V.

Esses fornos, em geral são monofásicos, sendo instalados entre duas fases da rede. Se não forem. Devido à isso são, geralmente, causa de desequilíbrio.

Existem três tipos de fornos de indução:

1. **Fornos de Indução a Canal:** Constituído por um ou mais recipientes metálicos termicamente isolados, em torno dos quais se constrói uma carcaça metálica e se deposita dentro a carga de trabalho. É construído

um canal na parte inferior, ligado a carcaça, de forma circular, com o material fundido da carga e as bobinas de indução, que operam na freqüência industrial. São utilizados na manutenção da temperatura de materiais fundidos e na fusão de materiais com menor ponto de fusão, como cobre alumínio e zinco.

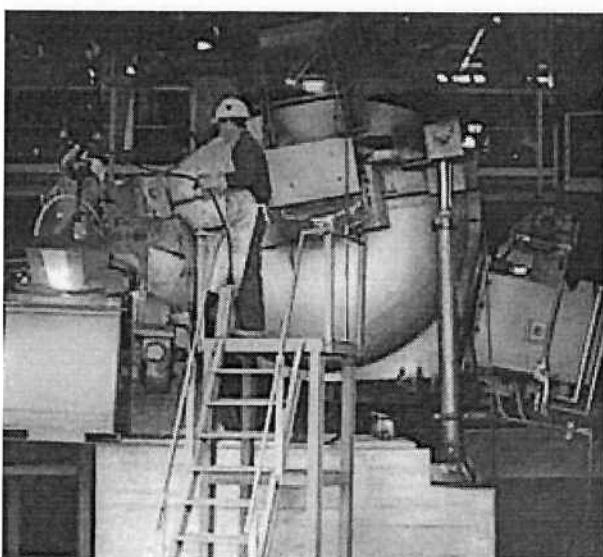


Fig 2.: Forno de Indução a Canal

- 2. Fornos a Indução de Cadiño:** Constituído por um recipiente circular isolado termicamente, envolvido por uma bobina de indução. Nele é depositado o material de trabalho. Utilizado também para manutenção de temperatura e fusão. Um efeito benéfico da utilização do forno de cadiño é a homogeneização da mistura, pois o metal fundido se movimenta dentro dele de forma regular, devida à força eletromagnética gerado pela bobina.
- 3. Fornos de Indução para Aquecimento de Tarugos:** Constituído de várias bobinas circulares instaladas no interior de um refratário onde a carga é introduzida e passa de uma ponta à outra do forno através de

roletes motorizados. As bobinas do forno podem ser dimensionadas de forma diferente, para que as condições do processo sejam mantidas e podem operar com diversas potências (convenientes para o processo).

### **2.5.3. Fornos a arco**

São fornos que se utilizam das propriedades do arco elétrico para a fusão de materiais, que ficam dentro de um recipiente refratário termicamente isolado. É o mais utilizado atualmente nas indústrias siderúrgicas. O arco elétrico é a passagem da corrente elétrica entre dois eletrodos através do ar. Tais fornos podem ser de três tipos diferentes:

1. **Fornos a arco submerso (arco-resistência):** Constituído por uma cuba revestida de refratários onde os eletrodos operam submersos na massa de trabalho, com energias de 300 a 6000kWh/t, em média. Podem ser monofásicos a um eletrodo, a dois ou trifásicos a três eletrodos.
2. **Fornos a arco indireto:** Constituído por uma cuba revestida de material refratário dentro do qual operam os eletrodos fixos horizontalmente, onde o arco é mantido. São utilizados para potências baixas (100 a 1000kVA).
3. **Fornos a arco Indireto:** Similar ao forno de arco indireto, mas com os eletrodos posicionados na vertical. Geralmente são trifásicos e funcionam com a formação de arco entre os eletrodos e a carga. O processo de funcionamento do forno é dividido em duas etapas: Período de fusão, onde a massa a ser fundida está em constante movimento e

ocorrem grandes variações de corrente, devido à instabilidade do arco.

Ocorrem nele cerca de 600 a 1000 curto-circuitos em aproximadamente 50 min, sendo assim, um período crítico na operação. O segundo é o Refino, onde o arco é mais estável devido ao estado líquido da carga.

O funcionamento do forno em curto se caracteriza pela tensão nula no arco (eletrodos em contato direto com a carga), com absorção de potência ativa nula (somente potência reativa é absorvida, o que resulta num fator de potência nulo). Um forno à arco indireto é constituído por cinco partes: A cuba refratária, eletrodos, transformador, cabos flexíveis, disjuntor de forno e painel de comando.

## **2.6. Fornos a gás natural**

### **2.6.1. Combustão no forno a gás**

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:



Onde: **Combustíveis**: em geral hidrocarbonetos ( $\text{C}_x\text{H}_y$ );

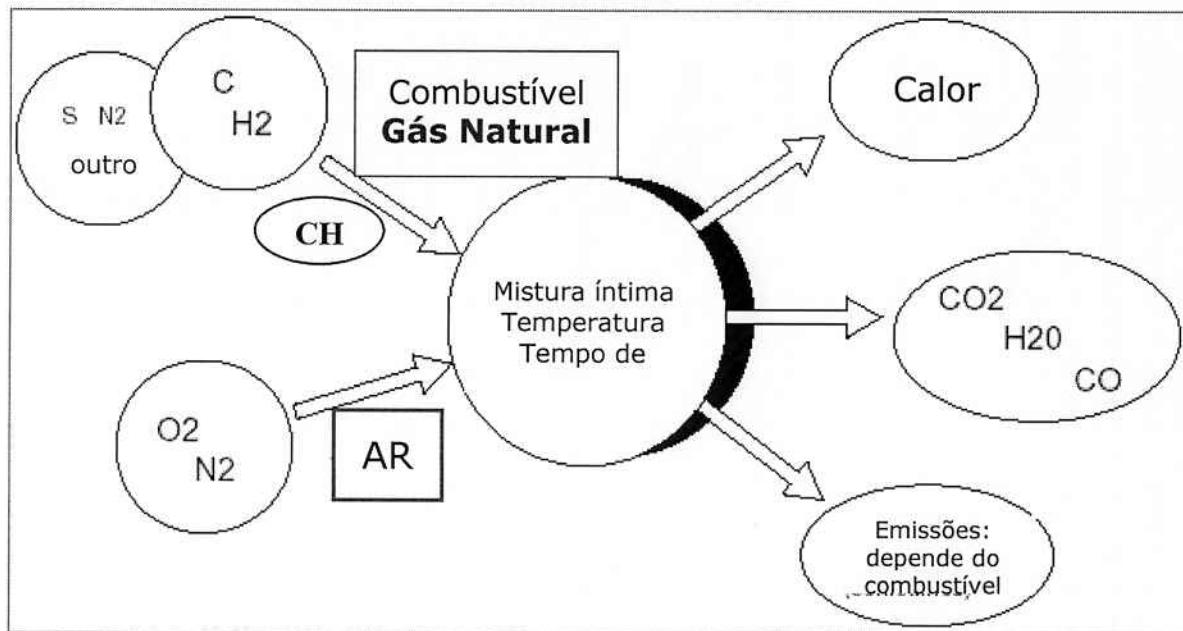
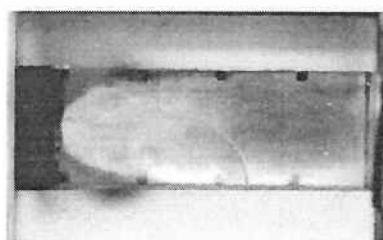


Figura 3: Processo de Combustão

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 ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). 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  $\text{SO}_2$  ou trióxido de enxofre  $\text{SO}_3$  durante a combustão), além de substâncias não combustíveis tais como matéria mineralizada (cinza), água, e gases inertes. No caso específico do  $\text{CH}_4$  (gás natural), a combustão resulta em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (água) e óxidos de nitrogênio em mínimas quantidades dependendo da qualidade da combustão (em altíssimas temperaturas).



A taxa da combustão (ver a formação da chama na Fig. 4) 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.

Figura 4: Chama de 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  $2000^{\circ}\text{C}$  em alguns casos.

A energia radiante é muito mais efetiva em transferir calor do que as demais porque deriva da própria chama (Fig. 5) e está diretamente relacionada com a sua temperatura (Fig. 6). 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 NOx. Na Fig. 5 se observa os sistemas de queima para o gás.

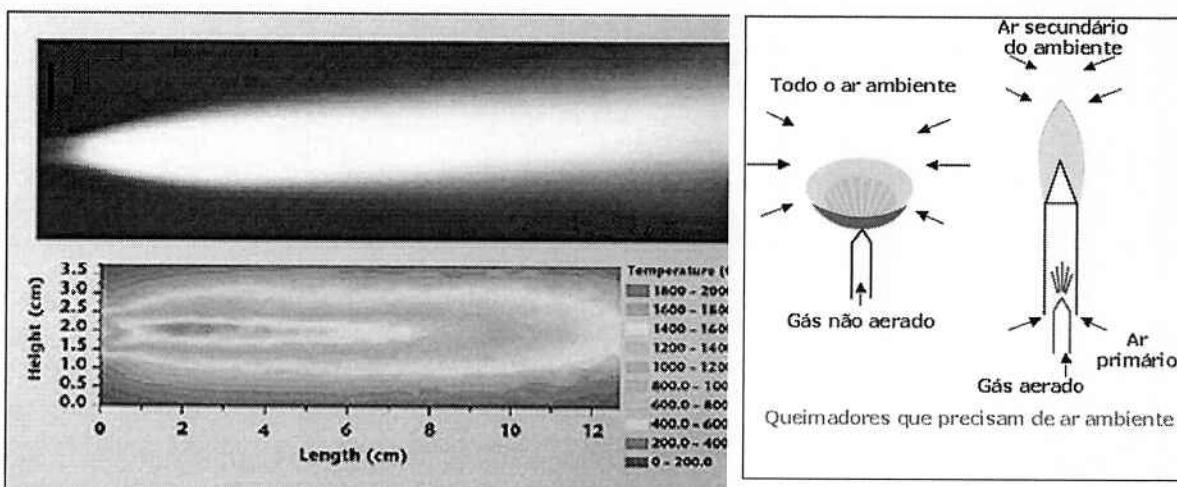


Figura 5: Temperatura da Chama

Figura 6: Dispositivos e sistemas  
Queimadores

### 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. 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.

## **2.6.2. Operação do forno a gás**

Um forno é composto por uma câmara inferior, denominada câmara de radiação, uma região superior, que é a zona de convecção, uma chaminé para os gases de combustão e um sistema de combustíveis que supre gás ou óleo combustível para os queimadores.

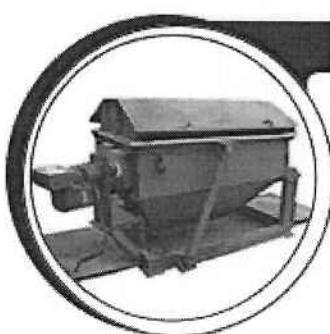


Fig 7. Forno a gás reverbero

Na câmara de radiação, grande parte do calor absorvido pelo processo é proveniente da liberação térmica da chama dos queimadores. Na zona de

convecção, a transferência de calor é proporcionada predominantemente pelos gases gerados pela combustão nos queimadores.

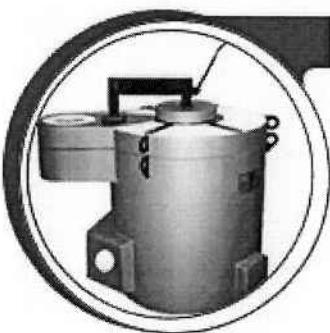


Fig 8: Forno a gás com cadiño

As principais variáveis operacionais num forno combustível são a temperatura de saída do fluido de processo do forno, a vazão através de um ou mais passes e a carga térmica a ser fornecida pelo sistema de combustíveis.

Normalmente, a tubulação de carga de um forno é dividida em vários passes dentro de um forno. A quantidade de passes para distribuir a vazão total de um fluido dentro de um forno é definida em função da carga térmica e da velocidade requerida para o produto ser aquecido.

Os fornos controlam a temperatura de saída do produto manipulando a vazão de combustível para os queimadores. Como os queimadores possuem restrições quanto a sua pressão de operação, alguns fornos substituem os controladores de vazão por controladores de pressão para implementação da proteção contra apagamento de chama por pressão muito baixa ou deslocamento de chama por pressão muito alta no queimador.



Fig 9.: Queimador de forno a gás

## **2.7. Ar propanado**

O ar propanado é um combustível substituto do gás natural, utilizado como combustível intercambiável com o Gás Natural. Tal gás não necessita de adaptações nos queimadores de um forno a gás natural, por ter poder calorífico semelhante.

O ar propanado é constituído de uma mistura de ar comprimido e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), que são misturados na própria planta, num processo controlado pela empresa fornecedora de GLP, e posteriormente injetado na tubulação de gás natural. A alta porcentagem de GLP presente na mistura com o ar faz com que ele não seja inflamável a temperatura ambiente, pois a taxa de inflamabilidade do GLP está na faixa de 8 a 11%.

Na Europa o ar propanado é utilizado como sistema de “backup” no caso de interrupção do fornecimento de gás natural, para garantia do suprimento de combustível. No Brasil, tal prática ainda se encontra em estágios iniciais.

## **2.8. Inteligência Artificial e Sistemas especialistas**

### **2.8.1. Inteligência Artificial**

Basicamente, pode-se definir inteligência artificial como uma alternativa de fazer com que uma máquina aja como um ser humano para tomar decisões. Isso implica num sistema computacional onde o programa é concebido com os mesmos mecanismos que um ser humano utiliza para suas ações cotidianas ou decisões mais complexas. Num programa concebido sem a utilização da inteligência Artificial, eventuais alterações para o processamento de um conjunto de novas informações devem ser feitas no programa como um todo, enquanto um sistema IA precisa apenas do acréscimo dessa nova informação, sem mais modificações.

Para a realização das tarefas diárias ou tarefas específicas, os seres humanos desencadeiam um processo de pensamento no qual são guiados do estado inicial para o objetivo final, que, ao ser realizado, guia a mente do indivíduo ao início de outro processo. Tal processo de pensamento é composto por fatos e regras, que, ao serem executados numa certa ordem levarão a realização de um objetivo. Pode-se exemplificar o mecanismo simplificadamente da forma que segue:

Objetivo: Escrever artigo técnico para publicação em congresso.

Fatos:

1. Para ser aprovado, o texto deve ser submetido a uma comissão de avaliação.

2. O artigo deve tratar do assunto relevante ao escopo do congresso para ser submetido à avaliação.
3. A comissão de avaliação deve julgar o texto de nível técnico adequado para a publicação.

Regras:

1. Se o artigo tratar de um assunto no escopo do projeto, então será avaliado.
2. Se o projeto for avaliado e a comissão avaliadora julga-lo de nível técnico adequado, então será publicado.

No exemplo acima, pode-se perceber as características de um sistema de pensamento. Existe um objetivo que, para ser atingido, deve ser submetido a uma série de regras decorrentes de certas condições (fatos).

Com um conjunto de regras e fatos limitado, a análise da situação é aparentemente simples. Mas a quantidade de informações armazenadas na mente das pessoas tornaria inviável a análise de todas para a solução de um problema específico. Por isso, a mente humana utiliza mecanismos de poda de informações. Tal mecanismo faz com que sejam analisadas somente informações relevantes para a solução de tal problema. No conjunto de fatos e regras anterior poderiam também estar presentes tais condições:

Fatos:

4. As taxas de juros caíram 0,5%, para 12% ao ano.

5. Não se deve atravessar a rua enquanto os carros estão passando.
6. A empresa XYZ, do ramo metalúrgico, possui em caixa trinta milhões de reais.
7. A remuneração anual da construção de hidroelétricas é de 12,3% ao ano.

Regras:

3. Se alguém atravessar a rua enquanto os carros estão passando, será atropelado.
4. Se uma pessoa for atropelada, ficará machucada.
5. Se as taxas de juro caírem, alguns empreendimentos tornar-se-ão viáveis para os investidores.
6. Quem tem mais de dez milhões de reais e atua no setor metalúrgico pode investir na substituição da eletrotermia por fornos a gás natural.

Se o objetivo ainda é a publicação de artigo técnico num congresso, tais regras e fatos são desnecessários para a análise. Sendo assim, o mecanismo de poda as elimina do processo, fazendo com que restem somente os fatos e regras relevantes para a tomada de decisão.

Além disso, existe também a possibilidade de aprendizado, através do mecanismo de inferência. Suponha-se, por exemplo, os seguintes fatos:

1. Um apartamento situado nas proximidades da Avenida Paulista e com 150m<sup>2</sup> de área custa R\$500000,00.
2. Um apartamento situado nas proximidades da Avenida Paulista e com 300m<sup>2</sup> de área custa R\$900000,00.

2. Um apartamento situado na Cidade Tiradentes e com 150m<sup>2</sup> custa 100000,00.

4. Um apartamento situado na Cidade Tiradentes e com 300m<sup>2</sup> custa 170000,00.

E as regras:

1. A pessoa X gosta de lugares espaçosos.
2. A pessoa X possui R\$ 200000,00 para comprar um apartamento.

Conclui-se assim que a pessoa X irá comprar um apartamento na Cidade Tiradentes. Esta nova informação será armazenada ao conjunto de fatos, o que significa que novo conhecimento foi gerado a partir dos fatos já conhecidos.

Dito isso, pode-se agora explicitar o objetivo de um programa IA, que funciona com o seguinte conjunto de ferramentas e procedimentos, inspirados nas ações humanas:

1. Definição dos Objetivos
2. Definição dos fatos
3. Obtenção de dados relevantes aos fatos e específicos de uma determinada situação.
4. Poda
5. Avaliação dos dados por meio das regras e inferências.

### **2.8.2. Sistemas Especialistas**

Teoricamente, um sistema que possui as características acima pode resolver qualquer problema que lhe fosse proposto, desde que fosse nele acrescentado o conhecimento necessário para tanto. Mas a capacidade dos computadores modernos de armazenar informação e o esforço necessário para que tal sistema que possui todo o conhecimento possível de ser adquirido faz com que a aplicação dessas técnicas seja restringida. Uma das formas de aplicação é através dos sistemas especialistas, que são projetados para resolverem problemas de um determinado domínio.

O conhecimento contido num SE é fornecido por especialistas no domínio em questão. Tal conhecimento é obtido através da experiência no campo de estudo e, com isso, o peso de cada regra nele contido é determinado pela experiência do especialista.

## **3. Metodologia do Trabalho**

Foi realizado um levantamento bibliográfico para verificação do estado da arte do tema. Além disso, para aprofundamento do estudo e desenvolvimento do projeto, foram analisados os seguintes segmentos:

- Qualidade da Energia Elétrica
- Processos Industriais (Para verificação das possibilidades de substituição).
- Equipamentos Industriais (funcionamento, custo, eficiência)

- Avaliação Econômica
- Qualidade do Produto
- Eficiência Energética

Será feito um levantamento bibliográfico dos segmentos acima descritos para que a partir deste seja feita tal análise. A partir dela foi feita a escolha dos aspectos mais relevantes de cada tema para a substituição da eletrotermia e que foram abordados no projeto.

Após tal análise foi escolhido um tipo de indústria para ser estudado quantitativamente, com o auxílio de um caso-piloto de substituição da eletrotermia, que envolveu os aspectos acima citados.

A partir de tal estudo, foi proposta então a metodologia de substituição da eletrotermia por gás natural. Ao final dessa etapa, foi proposta também uma arquitetura de sistema especialista para resolver tal problema.

## **4. Resultados do trabalho**

### **4.1. Esboço da metodologia de substituição**

Para que seja demonstrada a viabilidade da substituição da eletrotermia serão realizadas algumas etapas de análise e cálculo que serão detalhadas a seguir.

1. Escolha do Segmento Industrial: Antes de tudo, analisam-se os diversos setores industriais e seus gastos com eletricidade provenientes de fornos elétricos. Verificado um setor no qual o consumo de eletricidade é considerável e com maior variedade de usos de fornos elétricos

(resistência, indução e a arco) este foi o escolhido, devido à maior possibilidade de variações para um estudo acadêmico. Em casos reais esta etapa já está, logicamente, definida.

2. Análise da Planta Industrial e do Consumo de Energia Elétrica: Devem ser verificados na planta os equipamentos elétricos como um todo e os fornos elétricos em especial (qual o tipo, dados de placa), para que seja estimado o consumo de energia elétrica do equipamento para um dado processo.
3. Verificação do consumo energético: Com os dados de placa tanto do forno elétrico como do forno a gás devem ser determinados os consumos de energia por ambos.
4. Cálculo do Rendimento do processo: Com os dados de processo tabelados (quantidade de calor necessária para uma determinada carga), calcula-se, a partir da energia absorvida pelo equipamento, o rendimento energético do processo, tanto para o forno elétrico como para um similar que funcione com gás natural.
5. Verificação da qualidade do produto: Verifica-se a qualidade do produto do forno no caso tanto do forno elétrico quanto do forno a gás. Necessitam ser analisadas as implicações físicas e econômicas da mudança de forma de energia (melhora ou piora de propriedades físicas, valor de mercado, e outros).
6. Cálculo do Custo da Energia: Para os dois casos, deve ser calculado o custo total da energia consumida, assim como a quantidade de energia consumida.

7. Estudos de adaptação da planta elétrica: Nesta etapa, verificam-se os ajustes necessários à planta com a retirada de fornos do sistema elétrico, como por exemplo, necessidade de retirada de bancos de capacitores e outros equipamentos).
8. Cálculo do custo da infra-estrutura: No caso da substituição, devem ser calculados os gastos com o novo forno, com a rede de gás, mão de obra, além do tempo de retorno do investimento.
9. Comparaçao do consumo energético com o consumo de uma usina térmica que gerasse a energia necessária para alimentar um processo equivalente além de custos e emissões.

#### **4.2. Escolha do setor e justificativa**

Como base de dados para a escolha foi usada como base o estudo feito em [8] sobre energia térmica e eficiência energética, no qual foi realizado um levantamento de dados sobre o consumo de energia térmica e as possibilidades de substituição de eletrotermia por alguma fonte química (no caso gás natural).

Desse estudo, foram colhidos os dados que se encontram na tabela abaixo, que sintetizam os valores de economia de eletricidade possíveis em alguns setores industriais:

Setor Industrial	Usos finais de energia elétrica (ktEP)	Estimativa Moderada de economia (%)
Ferro e Aço	1111	24
Química e Petroquímica	160	53
Metais Não-Ferrosos	495	26
Minerais Não-Metálicos	56	43
Mineração	39	95
Alimentos e Tabaco	298	28
Têxtil e Couro	30	57

Tabela 1: Consumo de Energia por setor

Tais dados de economia de energia forma obtidos através da análise das indústrias em outros países, que utilizam energia química em alguns casos onde no Brasil é utilizada a energia elétrica para a produção de calor.

Observando-se os dados, percebe-se que o maior potencial de economia de energia bruta (em ktEP) encontra-se no setor de ferro e aço, seguido pelo de metais não-ferrosos. Contando ainda com o fato de haver grande diversidade de fornos nesses tipos de indústria, estes dois setores foram os escolhidos para a análise, já que também muitos processos são similares neles.

Em tal processo já foram verificados certos problemas envolvendo a qualidade do produto final com a substituição da eletrotermia, sendo o principal deles a diminuição do tamanho do grão no reticulado cristalino, que se dá pela ação de oxidantes resultantes da combustão incompleta do gás natural e também a descarbonatação do aço. Devem ser avaliadas no conjunto da

solução medidas mitigatórias para esse tipo de problema, que já foram temas de estudos recentes.

#### **4.3. Potenciais Benefícios**

Com a substituição da eletrotermia por fornos à gás natural, pode ocorrer uma diminuição na demanda por eletricidade, já que esta não poderá ser suprida num futuro próximo, se tudo continuar como está nesse momento (2006) em caso de adoção da medida por parte do setor industrial. Um efeito mais direto é a diminuição dos custos para as indústrias que adotarem a medida, especialmente no setor siderúrgico, como discutido em [5], num estudo sobre eficiência e energética na indústria siderúrgica. Também pode-se esperar uma maior diversificação da matriz energética brasileira, mas esse tipo de acontecimento também só ocorreria se a medida fosse adotada em grande escala.

#### **4.4. Considerações sobre a Planta Estudada**

Para a análise do problema, foi visitada a indústria metalúrgica Yadoya S.A. , localizada no município de Bom Jesus dos Perdões, a aproximadamente 50km de São Paulo. A empresa trabalha num regime contínuo durante a semana, sendo que aos fins de semana não opera. Contém, ao todo, um conjunto de quatro fornos indutivos, o que gera a necessidade da compensação do fator de potência na entrada da fábrica, apesar de que os fornos mais novos possuem compensação interna. O fator de potência medido na planta durante a semana era igual a 1, e durante os fins de semana

fortemente capacitivo, pois o banco de capacitores é mantido ligado de forma permanente.

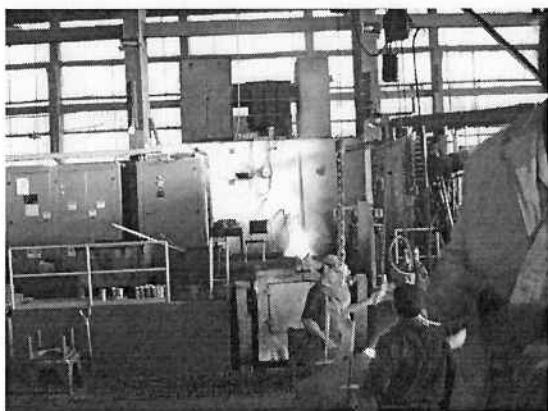


Fig. 10: foto da metalúrgica Yadoya S.A.

Na sua maior parte, os fornos foram comprados já usados, pois o custo inicial de um forno elétrico é demasiadamente alto, apesar de que o último forno adquirido pela empresa era novo.

Segundo o dono da empresa, na época do racionamento foi adquirido um forno a gás rotativo, de regime contínuo, alimentado por ar propanado. Mas as dificuldades de manutenção para o pessoal da fábrica e o custo do combustível fizeram com que tal opção fosse abandonada. No presente estudo, o ar propanado é utilizado apenas como backup.

#### **4.5. Considerações técnicas sobre a substituição**

Antes de serem feitos os cálculos de análise da viabilidade da substituição, devem ser verificados algumas questões técnicas que envolvem a qualidade do produto, pois mudanças na microestrutura do material podem descaracterizá-lo. A principal variável nesse tipo de combustão é o controle de temperatura, pois variações na temperatura do processo podem fazer com que o ferro fundido tenha tamanho de grão diferente do desejado. Para que tal

controle seja feito de forma mais efetiva num forno a gás, devem ser aumentados o número de queimadores com relação aos processos comuns, pois assim através da regulagem do volume de gás queimado em cada queimador tem-se uma distribuição mais uniforme da temperatura dentro da câmara de combustão.

Deve ser notado também que os resíduos da combustão, quando em contato com o ferro a ser fundido podem contaminá-lo, mudando sua composição e, assim, suas propriedades físicas. Portanto, deve ser feito o controle dos resíduos da combustão para que o processo não seja prejudicado.

#### **4.6. Análise da Viabilidade**

##### **4.6.1. Metodologia de Cálculo**

Numa visita feita a planta, foram colhidas as informações relevantes para a avaliação da metodologia. Tais informações são:

1. Características da planta, como quantidade de fornos elétricos e transformadores.
2. Potência nominal dos equipamentos.
3. Tempo de funcionamento da planta por mês.
4. Tempo de aquecimento do metal a ser fundido.
5. Tempo de fundição.
6. Temperatura atingida pelo processo.
7. Medição do ciclo de fusão do material.
8. Verificação dos capacitores de correção do fator de potência.

Além disso, havia sido realizado na empresa um estudo prévio que avaliava parâmetros de consumo de energia, de onde outras informações foram extraídas. De tal estudo, por exemplo, foi extraída a informação de que os transformadores de alimentação dos traços consumiam 16% da eletricidade consumida pelo forno em si. Feito isso, foi possível traçar-se um perfil da planta onde as informações necessárias para a avaliação da substituição e foi adotada a estratégia para o estudo. Tal estratégia consiste na avaliação de um dos fornos da indústria, de 1200kW, mas com capacidade de operação limitada em 750kW por razões operacionais, por um forno a gás similar, com a mesma capacidade de fundição em massa.

Definida a estratégia, pode-se começar o estudo propriamente dito, no qual devem ser levantados parâmetros tanto técnicos, como já mencionado, como econômicos. Inicialmente serão apresentados os parâmetros técnicos do processo:

<b>Massa de Ferro a ser Fundida(kg/h)</b>	1000
<b>Variação de Temperatura(°C)</b>	1475
<b>Tensão de Entrada (kV)</b>	13,8
<b>Tempo para aumento da temperatura (h)</b>	1
<b>Tempo para fusão (h)</b>	1
<b>Horas de funcionamento mensal</b>	480
<b>Rendimento do forno a gás (%)</b>	40
<b>Rendimento do Forno elétrico (%)</b>	65
<b>Poder Calorífico Superior do gás (kcal/m<sup>3</sup>)</b>	9400

Tabela 2: Características técnicas do processo de fundição

Equipamento Elétrico	Preço(R\$)
Forno elétrico 750kW para 1000kg + frete + instalação	400000

Tabela 3: Preço do equipamento elétrico

Agora serão apresentados os parâmetros econômicos levantados:

Equipamentos a gás	Preço (euros)	Preço (R\$)
1 Forno a gás de 750KW para 1000kg	41.360	108.896,75
1 Cadiño para 1000kg de Ferro Gusa	1.418	3.733,45
Custos de transporte	25.666,8	67.578,12
Custos de instalação	21.389	56.315,10
Total	89.833,8	236.523,41

Tabela 4: Preço dos equipamentos a gás

A empresa Yadoya utiliza tarifação Horo-Sazonal verde, onde a concessionária de energia é a Elektro®. Numa negociação a empresa conseguiu fazer com que a tarifa de ponta seja duas vezes a tarifa fora de ponta. Sendo assim, as tarifas utilizadas neste estudo, sendo considerada a média entre os períodos seco e úmido, são as seguintes:

<b>Tarifa Média do Horário de Ponta (R\$/kWh)</b>	0,134
<b>Tarifa Média do Horário Fora de Ponta</b>	0,268
<b>Tarifa de Demanda (R\$/kWh)</b>	11,73

Tabela 5: Tarifas de energia Elétrica – Fonte: Elektro

No caso da substituição por gás, serão utilizadas as seguintes tarifas:

<b>Custo fixo do gás (R\$/mês)</b>	3.893,42
<b>Tarifa do gasoduto real(R\$/m<sup>3</sup>)</b>	1,237

Tabela 6: Tarifas de gás – Fonte: Comgás

A partir de tais dados, foram calculadas as quantidades de energia consumidas e os custos dessa energia, tanto da energia elétrica quanto do gás. A energia consumida pelo processo foi calculada a partir dos parâmetros elétricos e então convertida para kcal, para poder ser avaliado o volume de gás necessário (que inclusive determina a faixa de preço por m<sup>3</sup>). Tal procedimento será detalhado agora.

De posse dos dados nominais do forno elétrico, como potência e rendimento, calcula-se a energia consumida pelo processo com a seguinte equação:

$$E_p = (\eta * P_{Nom} * h) + (\eta * P_{fusão} * h) \quad (23)$$

Onde:

$E_p$ : Energia consumida pelo processo em 1 mês

$\eta$ : Rendimento do Forno Elétrico

$P_{Nom}$ : Potência Nominal do Motor

h: Número de horas por mês de funcionamento do forno por mês

P<sub>fusão</sub>: potência necessária para a fusão do material

Nesta equação, chamam a atenção as diferentes potências utilizadas.

Tal fato se justifica porque o primeiro valor de potência, o nominal, é utilizado na parte do processo onde a temperatura do metal deve ser elevada e a quantidade de calor necessária é maior do que no segundo processo, somente de fusão, onde é utilizada uma potência menor, já que o calor fornecido é somente para a mudança de estado físico e não mais para aumento da temperatura. Além disso, a indústria opera num regime de trabalho 24h de segunda a sexta-feira. Sendo assim foi considerado um regime de trabalho contínuo no forno, onde 1 hora é gasta no aquecimento do metal e 1 hora é gasta na sua fusão.

Para o cálculo da energia utilizada pelo forno, tem-se a equação:

$$E_f = \frac{E_p}{\eta} \quad (24)$$

Onde:

E<sub>f</sub>: Energia utilizada pelo forno elétrico no mês

E<sub>p</sub>: Energia utilizada pelo processo no mês

$\eta$ : Rendimento do Forno Elétrico

Com a equação acima foi calculada a energia utilizada pelo forno.

Sabendo-se que a energia usada pelo transformador é 16% desse valor, tem-se:

$$E_{trafo} = 0,16 * E_f \quad (25)$$

Onde :

$E_{trafo}$ : Energia consumida pelo transformador no mês

Tendo esses valores de energia e somando-os, é obtido o valor de energia elétrica consumida no mês.

Agora, tendo como base o valor de energia consumida no processo, que não varia com a mudança do combustível, será feita a comparação do consumo energético de eletricidade com o gás natural.

Primeiramente, para que a comparação seja possível, será escolhida uma unidade de energia comum para os dois processos, já que energia elétrica é normalmente medida em kWh e energia térmica em kcal. Para este estudo, como a grandeza analisada é a quantidade de calor gerada, foi utilizada a unidade kcal. Com isso, a quantidade de calor utilizada no processo, em kcal é dada por:

$$Q_p = 8760 * E_p \quad (26)$$

Onde  $Q_p$  é a quantidade de calor em kcal necessária por mês.

Como o rendimento do forno a gás é aproximadamente 40%, foi calculada a energia utilizada pelo forno:

$$Q_{forno} = 0,4 * Q_p \quad (27)$$

Onde  $Q_{forno}$  é a energia total consumida pelo forno a gás.

Sabendo-se cada m<sup>3</sup> de gás queimada gera 9400 kcal, foi calculado o volume de gás natural utilizada no processo:

$$V = \frac{Q_{forno}}{9400} \quad (28)$$

Onde V é o volume de gás natural consumido em 1 mês.

#### **4.6.2. Cálculo para fornos novos e forno elétrico com 5 anos (caso base)**

Os valores calculados para todas as grandezas detalhadas acima estão apresentados na tabela abaixo:

Energia Consumida no mês pelo processo (kWh)	132.600
Energia Consumida pelo forno elétrico (kWh)	204.000
Energia consumida pelo transformador (kWh)	38.857
Energia Consumida no mês pelo processo (kcal)	114.036.000
Energia Consumida pelo forno a gás (kcal)	285.090.000
<b>Volume de gás consumido (m<sup>3</sup>)</b>	<b>30.328,7234</b>

Tabela 7: Consumo de energia do processo elétrico ou a gás

As informações da tabela acima foram necessárias para que pudesse ser calculado o custo da energia consumida pelas duas fontes de energia que foram comparadas, já que a energia elétrica é cobrada por kWh e o gás por m<sup>3</sup> consumido. Sabidos os valores cobrados pelas duas formas de energia na região, pôde-se proceder ao cálculo dos custos da energia envolvidos no período de 1 mês, que dá início ao processo de análise da viabilidade econômica.

O custo da energia elétrica foi calculado através da seguinte equação:

$$Custo_{eletr} = (E_f * h_{fp} * T_{fp}) + (E_f * h_p * T_p) + (E_{trafo} * h_{fp} * T_{fp}) + (E_{trafo} * h_p * T_p) + 2 * (P_{nom} * d) \quad (29)$$

Onde:

$h_{fp}$ : Porcentagem do tempo total onde é cobrada tarifa fora de ponta

$T_{fp}$ : Tarifa fora de ponta

$h_p$ : Porcentagem do tempo total onde é cobrada tarifa de ponta

$T_p$ : Tarifa de ponta

d: Tarifa de Demanda (no caso, igual no horário de ponta e fora de ponta)

Já o custo do gás foi calculado da forma a seguir:

$$Custo_{gás} = C_{fixo} + T_{gás} * V \quad (30)$$

Onde:

$T_{gás}$ : Tarifa de gás.

$C_{fixo}$ : Tarifa fixa de gás

Os valores de tarifa acima citados, tanto para o gás quanto para a eletricidade, dependem da classe de consumo da empresa. Dadas, então, os equações, foram calculados os custos mensais:

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	41.410,05
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53.392,14

Tabela 8: Custo da energia mensal

Através dos valores acima calculados, pode-se concluir que, para somente um forno, o uso do gás apresenta uma economia de aproximadamente R\$12.000,00 por mês, com relação ao uso da eletrotermia. Sendo assim, pode-se proceder para a etapa seguinte do estudo, que é a determinação do tempo de retorno do investimento. No caso de um empreendimento novo, a alternativa mais viável é, desde o início, o forno a gás, que apresenta custo menor e não possui a necessidade de um equipamento como um transformador, necessário na entrada do forno elétrico, fazendo com que o custo aumente. Além disso, o forno a gás possui custo mensal menor. Para que se verifique a vantagem no período de vida que o uso do forno a gás pode oferecer, será utilizada uma ferramenta econômica chamada de Custo do Ciclo de Vida (CCV), cuja equação é dada por:

$$CCV = C_{in} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{en}}{(1+j)^i} \quad (31)$$

Onde:

$C_{in}$ : Custo inicial do investimento

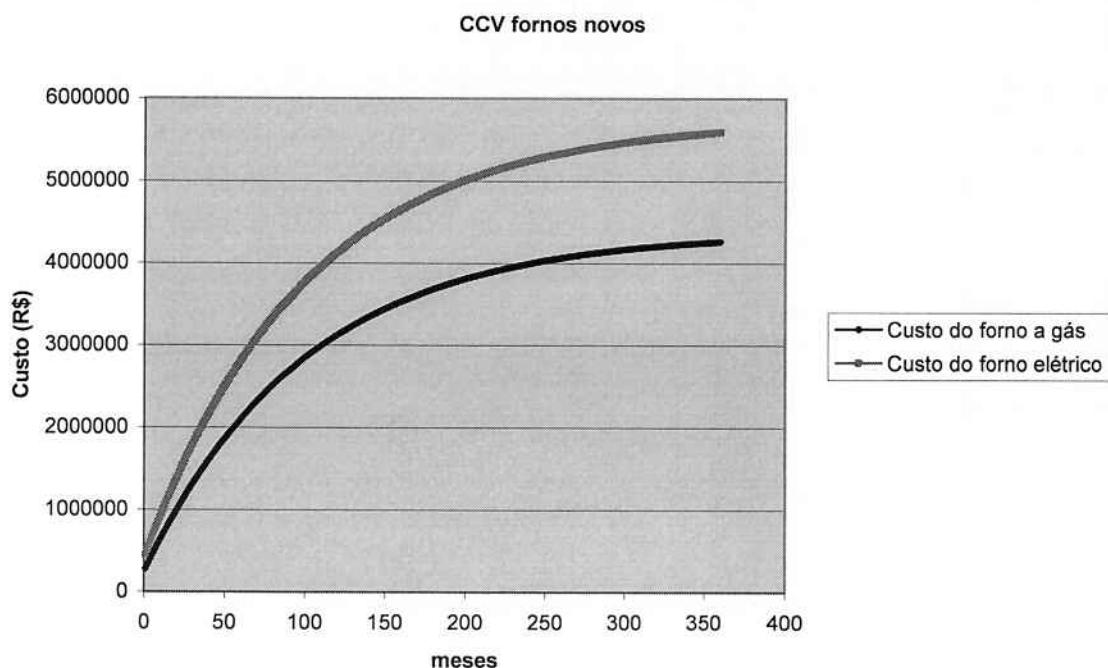
$C_{en}$ : Custo da Energia mensal

j: Taxa de juros

i: Mês onde está sendo feito o cálculo

n: número de meses total do ciclo de vida

Dados os custos iniciais dos fornos, foi analisada, através dos gráficos abaixo, qual a diferença no custo do ciclo de vida.



O resultado final do custo do ciclo de vida aparece na tabela:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás:</b>	4262339,446
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico:</b>	5590695,021

Tabela 9: Custo do Ciclo de Vida para os fornos novos

Mas, no caso de um equipamento eletrotérmico pré-existente, onde os investimentos de aquisição já foram feitos, deve-se fazer a comparação através de alguma ferramenta econômica, que neste caso será o Custo do Ciclo de

Vida (considerando que tal ciclo é de 30 anos para os dois equipamentos). A equação é a seguinte:

Feitos os cálculos para as duas alternativas, onde só o forno a gás possui custo inicial, foram obtidos os resultados que seguem:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás:</b>	4.262.339,446
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico:</b>	5.190.695,021

Tabela 10: Custos dos Ciclos de Vida

A tabela 8 foi calculada considerando-se uma taxa de juros de 12% ao ano. Observando-a, percebe-se que a economia no uso do forno a gás é próxima de 20%. Através do gráfico de custo do ciclo de vida acumulado, pode-se perceber o período no qual os custos foram igualados.

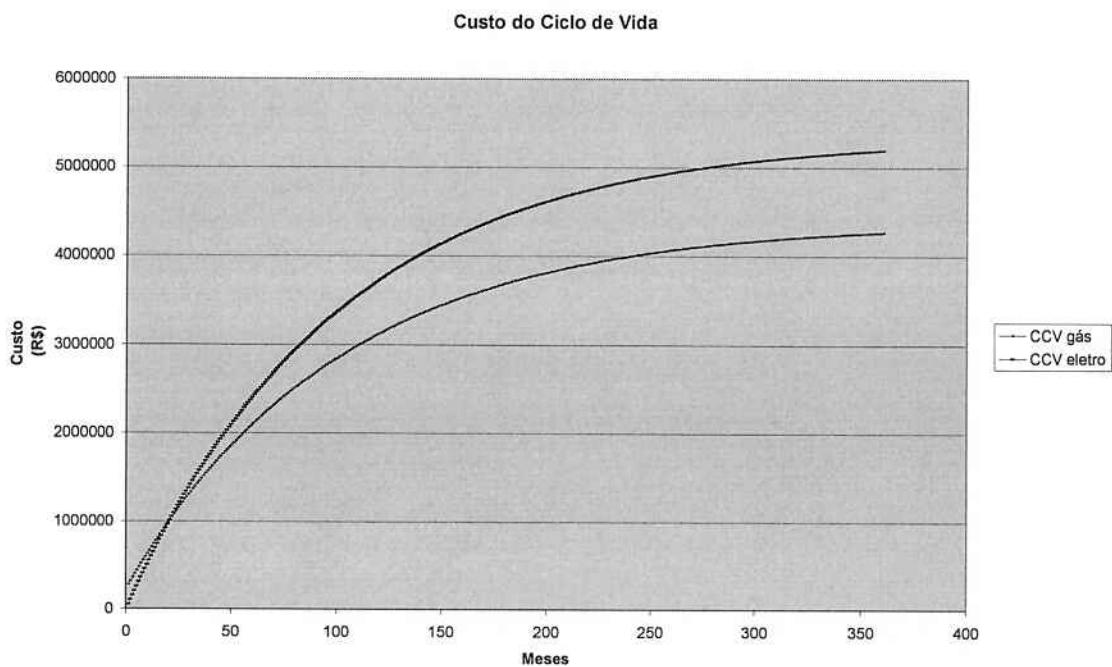


Gráfico 2: Custos dos Ciclos de Vida dos fornos elétrico e à gás

Através do gráfico chega-se a conclusão de que o tempo para que o investimento seja recuperado é de 21 meses, neste caso.

Foi calculada também a Taxa Interna de Retorno (TIR), um indicativo mais comum de atratividade do investimento. Tal valor é obtido através da equação do valor presente líquido, dada abaixo, quando este é zero.

$$VPL = C_{Inv} + \frac{\sum_{i=1}^n C_{en}}{(1+j)^i} \quad (32)$$

Onde:

VPL: Valor Presente Líquido

C<sub>Inv</sub>: Custo do Investimento (fluxo negativo)

C<sub>en</sub>: Custo da energia economizada

j: Taxa de Juros

n: Número de meses analisados.

Nesse caso, a TIR calculada foi de 4,026% ao mês, mostrando que o investimento é atrativo.

Além desses casos básicos, foram também analisados alguns outros casos onde ocorrem alterações de alguns parâmetros significativos para o cálculo da energia consumida pelo processo ou o preço do processo final.

O primeiro dos parâmetros analisado foi o rendimento dos fornos. Foram feitas as seguintes variações:

1. Forno a gás com rendimento diminuído para 35%.
2. Forno elétrico com rendimento aumentado para 70%.
3. Forno a gás com rendimento 35% e forno elétrico com rendimento 70%.

#### **4.6.3. Análise do caso de rendimento 35% para o forno a gás**

Com a mudança no valor do rendimento, alguns valores de energia e custos tiveram que ser recalculados, para que a análise continue consistente. A metodologia de cálculo continua sendo a mesma do caso inicial. Sendo assim, serão apresentados os novos valores para o novo rendimento do forno a gás:

<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kWh)</b>	132600
<b>Energia Consumida pelo forno elétrico (kWh)</b>	204000
<b>Energia consumida pelo transformador (kWh)</b>	38857,14286
<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kcal)</b>	114036000
<b>Energia Consumida pelo forno a gás (kcal)</b>	325817142,9
<b>Volume de gás consumido (m<sup>3</sup>)</b>	34661,39818

Tabela 11: Valores de Consumo energético para rendimento do forno a gás de 35%

Como é previsível, a energia necessária com o forno a gás rendimento mais baixo aumentou, tal qual o volume de gás consumido. Com isso, foi verificado o impacto de tal aumento no custo mensal de gás e a comparação com o custo da energia elétrica.

<b>Custo fixo do gás (R\$/mês)</b>	3893,42
<b>Tarifa do gasoduto real(R\$/m3)</b>	1,237
<b>Custo do gás consumido(R\$/mês):</b>	46769,56954
<b>Custo da eletricidade consumida:</b>	53392,14286

Tabela 12: Custos da Energia com o rendimento do forno a gás de 35%

A diferença de custos mensais de gás e eletricidade, neste caso, diminuiu quase que pela metade (R\$6.400,00, aproximadamente contra R\$12.000,00 anteriores). Tal fato fez com que o tempo de retorno do investimento aumentasse. Através dos gráficos do CCV, podemos ver com tal diferença ficou caracterizada:

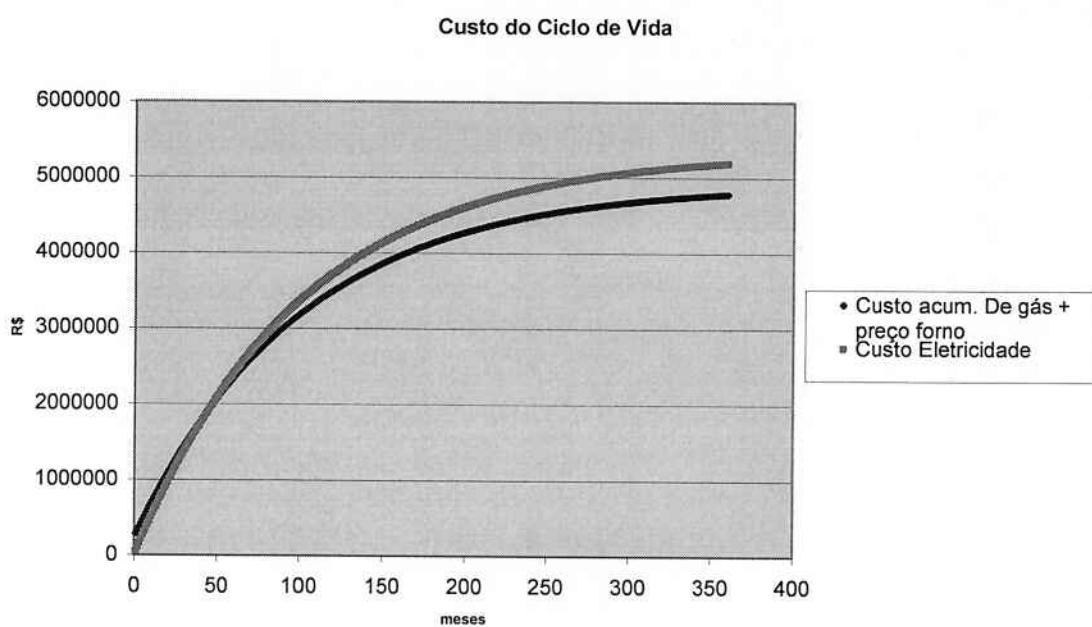


Gráfico 3: CCV com rendimento do forno a gás de 35%

Percebe-se pelos gráficos acima que o tempo de retorno aumentou de forma significativa, para a faixa dos 45 meses. Tal tempo de retorno, menor que 5 anos, pode ainda ser considerado baixo. A diferença do CCV é dada pela tabela abaixo:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás (R\$):</b>	4.783.382,908
--	---------------

**Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico (R\$): 5.190.695,021**

Tabela 13: CCV para forno a gás com rendimento de 35%

Nesse caso, a TIR calculada foi de 1,782% ao mês, que ainda pode ser considerada atrativa, considerando o tempo de vida do forno a gás.

#### **4.6.4. Análise do Caso de Rendimento 70% para o Forno elétrico**

Neste caso, também tiveram que ser recalculados valores de energia e custos, só que desta vez no sentido de diminuição destes no caso do forno elétrico. Sendo assim, são apresentados os novos valores de energia calculados:

<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kWh)</b>	142.800
<b>Energia Consumida pelo forno elétrico (kWh)</b>	204.000
<b>Energia consumida pelo transformador (kWh)</b>	38.857,14
<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kcal)</b>	122.808.000
<b>Energia Consumida pelo forno a gás (kcal)</b>	307.020.000
<b>Volume de gás consumido (m<sup>3</sup>)</b>	32.661,7

Tabela 14: Energia Consumida no caso de rendimento do forno elétrico 70%

Com tal mudança de configuração, percebeu-se a diminuição do consumo de energia elétrica e consequente diminuição dos custos dessa forma de energia. Tais custos são apresentados abaixo:

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	44.295,94
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53.392,14

Tabela 15: Custos mensais da Energia com rendimento do forno elétrico 70%

Neste caso a diferença de economia mensal passou de R\$12.000,00 por mês para aproximadamente R\$9.000,00, o que aumentou o tempo de retorno do investimento com relação ao caso original, mas com menor influência que a alteração do rendimento no forno a gás natural. Pode-se ver a situação através dos gráficos de CCV:

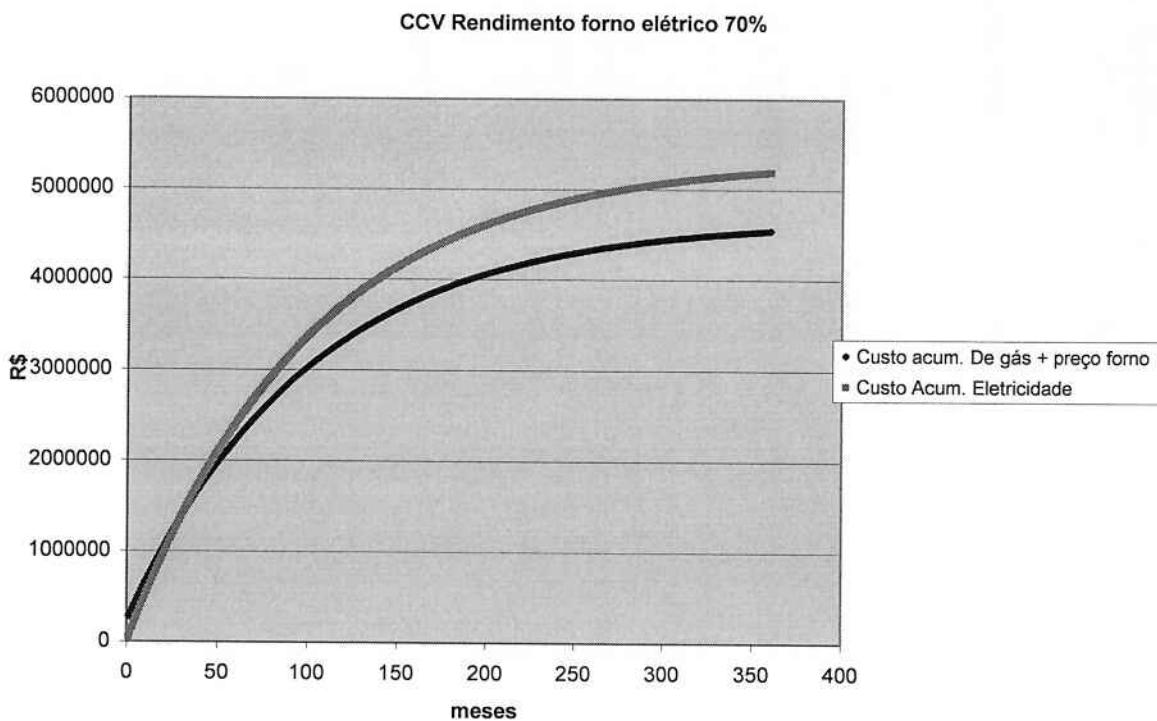


Gráfico 4: CCV dos fornos para o caso do forno elétrico com rendimento de 70%

Percebe-se pelo gráfico acima que o tempo de retorno do investimento aumentou, mas não tanto quanto no caso anterior. Neste caso ele é de 31 meses. Os CCV finais estão mostrados na tabela abaixo:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás:</b>	4542901,31
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico:</b>	5190695,02

Tabela 16: CCV dos fornos no caso do forno elétrico com rendimento de 70%

Nesse caso, a TIR calculada foi de 2,818% ao mês, que é uma taxa bastante atrativa.

#### **4.6.5.Análise do caso com Rendimento de 70% para o Forno Elétrico e 35% para o forno a Gás Natural (Caso desfavorável)**

Neste caso, onde os valores de energia e custos já foram calculados para cada hipótese considerada separadamente, serão mostradas as tabelas e gráficos para as duas condições juntas, onde será verificada a diferença de custo neste caso onde as condições para a substituição são mais desfavoráveis que as anteriores.

<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kWh)</b>	142.800
<b>Energia Consumida pelo forno elétrico (kWh)</b>	204.000
<b>Energia consumida pelo transformador (kWh)</b>	38.857
<b>Energia Consumida no mês pelo processo (kcal)</b>	122.808.000
<b>Energia Consumida pelo forno a gás (kcal)</b>	350.880.000

Tabela 16: Energia consumida no caso desfavorável

Como nesse caso houve aumento no consumo de gás e diminuição no consumo de eletricidade, a diferença de preços e consequente atratividade da substituição diminuíram, como mostra a tabela a seguir:

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	50067,73
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53392,14286

Tabela 17: Diferença de custos mensais no caso desfavorável

A diferença de custo mensal neste caso é inferior a R\$3.500,00 por mês, com isso, o tempo de retorno do investimento aumentou, como pode ser visualizado no gráfico:

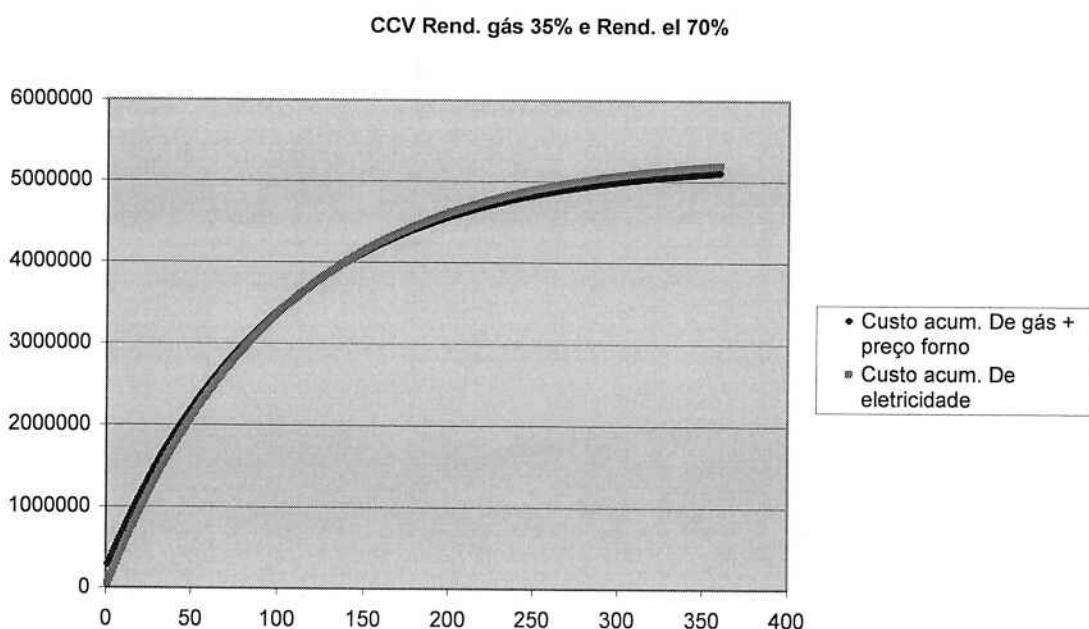


Gráfico 5: CCV dos fornos no caso desfavorável

Neste caso, o aumento do tempo de retorno do investimento é significativo, chegando a 123 meses. O CCV é apresentado na tabela a seguir:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás (R\$/mês):</b>	5104025,04
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico (R\$/mês):</b>	5190695,02

Tabela 18: CCV dos fornos para o caso desfavorável

Nesse caso, a TIR calculada foi de 0,392% ao mês, que é uma taxa relativamente baixa e pouco atrativa ao investidor.

Após as análises dos casos com diferentes rendimentos, foram analisados casos onde ocorrem variações na tarifa do gás, tomando como base o caso original. Foram analisadas as seguintes variações de tarifa:

1. Aumento de 10% no preço do m<sup>3</sup>
2. Aumento de 20% no preço do m<sup>3</sup>
3. Aumento no qual a substituição deixa de ser economicamente viável.

#### **4.6.6. Análise do caso de aumento de 10% na tarifa de gás**

Neste caso, os novos custos mensais do gás em comparação com a energia elétrica são os seguintes:

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	45161,71
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53392,14

Tabela 19: Custos mensais de energia com aumento de 10% na tarifa de gás

Com isso, a economia mensal diminui para R\$ 8.200,00. O tempo de retorno para essa condição é mostrado pelo gráfico a seguir:

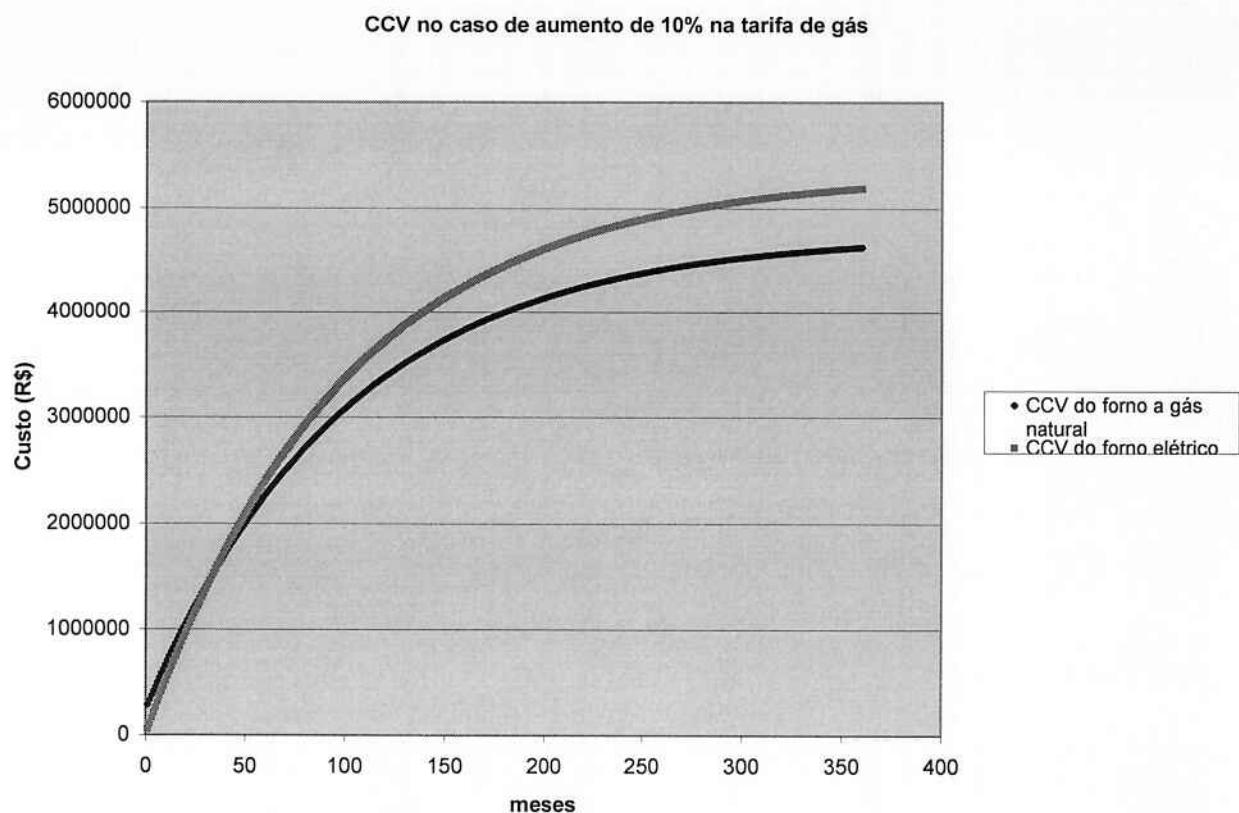


Gráfico 7: CCV dos fornos no caso de aumento de 10% na tarifa de gás natural

Neste caso, o tempo de retorno do investimento é de 34 meses. O CCV final está mostrado na tabela a seguir:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás:</b>	4627069,87
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico:</b>	5190695,02

Tabela 19: CCV dos fornos com aumento na tarifa de 10%

Para esse caso, a TIR calculada foi de 2,455% ao mês, ou seja, bastante atrativa.

#### **4.6.7. Análise do caso de aumento de 20% na tarifa de gás**

Com tal aumento, a atratividade do investimento diminui, como pode ser visto na tabela abaixo:

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	48913,38
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53392,14

Tabela 20: Custo mensal da energia no caso de aumento da tarifa de gás em 20%

Nesse caso a economia diminui de forma significativa, passando a ser de aproximadamente R\$5.400,00 por mês. Com isso, o tempo de retorno do investimento aumenta da forma mostrada no gráfico a seguir:

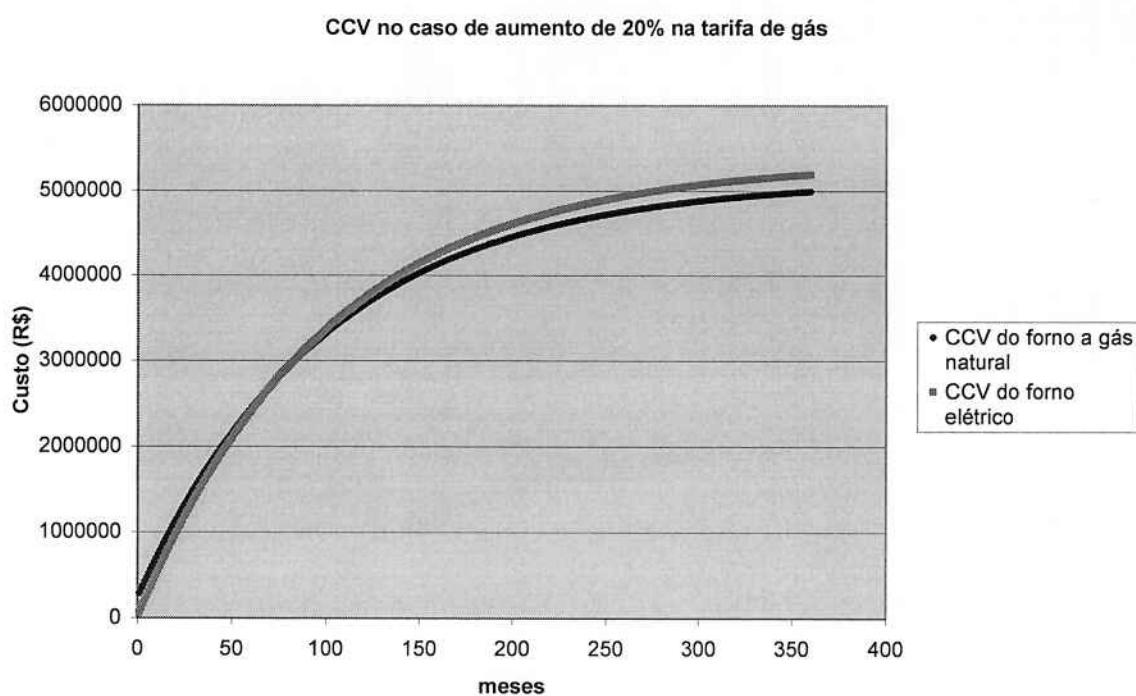


Gráfico 8: CCV com aumento de 20% na tarifa de gás

Neste caso, o tempo de retorno do investimento é de 75 meses. O CCV pode ser visto na tabela abaixo:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás (R\$/mês):</b>	4991800,293
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico (R\$/mês):</b>	5190695,021

Tabela 20: CCV nos fornos com aumento de 20% na tarifa

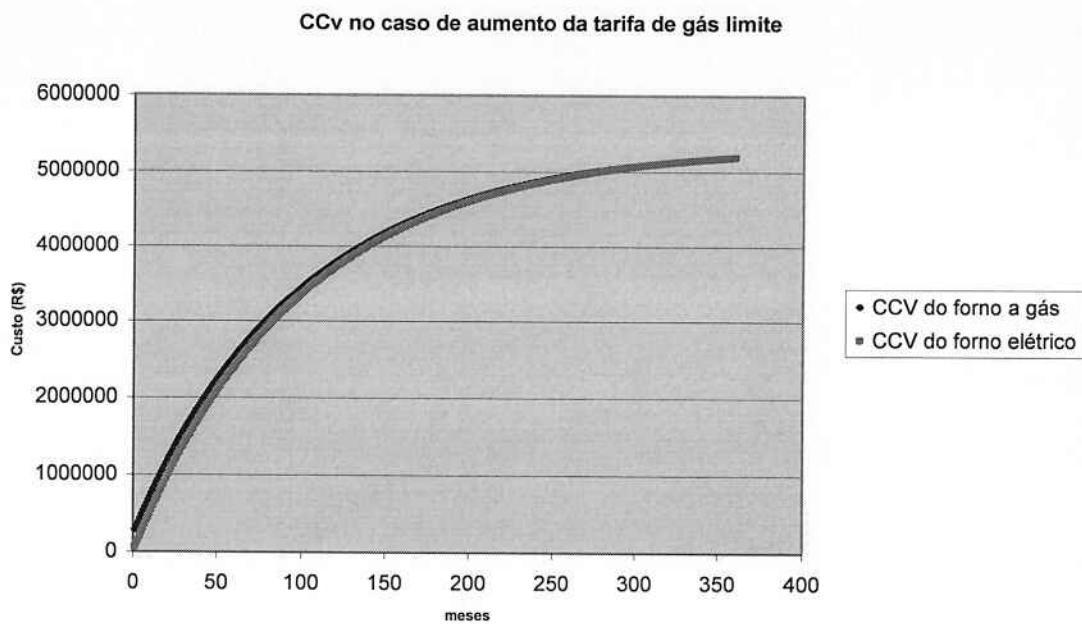
Neste caso, a TIR é de 0,833% ao mês, um valor relativamente baixo.

#### **4.6.8. Análise do caso limite**

Com tais variações no preço, é possível observar-se que existe um valor de tarifa cuja viabilidade na substituição não ocorre mais. Com isso, investigou-se qual é essa taxa, utilizando-se a metodologia que vem sendo seguida durante este trabalho. De tal análise, onde os valores dos custos mensais são praticamente iguais, exceto o custo inicial do forno a gás, foi encontrada uma taxa de 25,5% de aumento que torna inviável a substituição.

<b>Custo do gás consumido (R\$/mês):</b>	50976,79
<b>Custo da eletricidade consumida (R\$/mês):</b>	53392,14

Tabela 21:Custo mensal da energia no caso limite



Nesse caso, o CCV é o apresentado na tabela abaixo:

<b>Custo do Ciclo de Vida Forno a Gás:</b>	5192402,03
<b>Custo do Ciclo de Vida Forno Elétrico:</b>	5190695,02

Tabela 22: CCV dos fornos no caso de aumento da tarifa de gás limite

Como esperado, a TIR no caso limite é 0.

#### **4.7. Discussão dos resultados**

A análise desse caso real fornece algumas conclusões importantes:

1. Variações no custo da energia influenciam de forma decisiva na viabilidade da substituição.

2. O rendimento dos fornos também é determinante na análise de viabilidade.
3. O investimento inicial necessário é relativamente alto para empresas de pequeno porte.

De tais conclusões, a mais significativa no contexto atual é a primeira, pois a recente crise no fornecimento de gás com a Bolívia levou os usuários a certo temor quanto a utilização de tal insumo. A possibilidade de falta de gás e consequente paralisação da produção é o temor dos empresários, já que o prejuízo com alguns dias de paralisação pode ser bem maior que os ganhos advindos da substituição. Devido a isso, os cálculos da substituição não foram feitos com os preços do fornecimento interruptível, que deixaria as empresas consumidoras de gás sem ter o que fazer. Sendo assim, as empresas podem reivindicar perante as concessionárias os prejuízos, caso uma contingência de ordem política ocorra.

Além desse problema, atualmente o gasoduto Brasil-Bolívia está com praticamente toda sua capacidade já contratada. Mas os investimentos feitos para a exploração da Bacia de Santos visam um suprimento adicional de 30 milhões de m<sup>3</sup> de gás natural por dia até 2011, fato que revela uma grande oportunidade de exploração de tal mercado.

Em caso de interrupção por motivos técnicos, deve-se ter armazenado algum tipo de substituto que não demande alterações nos componentes do forno à gás. Tal combustível deve ter o mesmo poder calorífico do gás natural para tanto. A verificação de tal propriedade do gás se dá através do número de Wobbe, cuja equação é dada por:

$$W = \frac{pc}{\sqrt{d_{ar}}} \quad (33)$$

No caso, tem-se a mistura ar/GLP, chamada ar propanado, que, para possuir o mesmo numero de Wobbe do gás Natural (12675kcal/m<sup>3</sup>), deve ser composto de 61%GLP e 39% ar, em condições ambiente. Deve-se ter estocado um volume tal que seja possível suprir a interrupção sem prejuízo do processo produtivo, portanto, o estoque deve ser suficiente para alguns dias, pelo menos.

#### **4.8. Sistema Especialista para Avaliação da Substituição da Eletrotermia por Gás Natural**

Como visto anteriormente, o sistema especialista(SE) necessita de um conjunto de fatos e regras de um problema específico para inferir novo conhecimento. Neste estudo, a análise de um caso real serviu não só para avaliação da metodologia como para que o conhecimento necessário para a formação de um especialista no problema fosse adquirido, tornando assim possível a determinação dos fatos relevantes para o estudo e a confecção das regras do SE.

Pode-se ter como fatos que devem servir de entrada para o SE:

1. Potência do forno Elétrico
2. Quantidade de massa a ser fundida num determinado período

3. Tempo necessário para o processo de aquecimento
4. Tempo necessário para a fusão do metal
5. Tempo de funcionamento mensal da planta
6. Rendimento do Forno Elétrico
7. Rendimento do Forno à gás natural
8. Energia necessária ao processo
9. Tarifa de energia elétrica
10. Tarifa de gás natural
11. Custo de equipamento elétrico
12. Custo do equipamento à gás natural
13. Custo Mensal da energia elétrica utilizada
14. Volume de gás consumido
15. Custo Mensal do gás natural utilizado
15. Ciclo de Vida do Forno Elétrico
16. Ciclo de vida do forno à gás natural.
18. Custo do Ciclo de Vida do forno elétrico
19. Custo do Ciclo de Vida do forno à gás natural
20. Tempo de retorno do investimento desejado
21. taxa de juros praticada.

Dados estes fatos tem-se as seguintes regras iniciais:

1. Se ambos os fornos são novos, então:

    1.1. Avaliar os custos iniciais e as tarifas mensais das duas alternativas.

1.2. Se custo inicial e a tarifa mensal de energia da alternativa a gás forem menores, então forno a gás é viável.

1.3. Se custo inicial e a tarifa mensal de energia da alternativa elétrica forem menores, então forno a gás é viável.

1.4. Se custo inicial do forno à gás for maior e tarifa mensal for menor, então calcular CCV das duas alternativas

1.4.1. Se o tempo de retorno for maior que o desejado, então a utilização não é viável e a utilização do forno elétrico é viável.

1.4.2. Se o tempo de retorno for menor que o desejado, então a utilização é viável e o forno à gás deve ser utilizado.

1.5. Se custo inicial do forno à gás for menor e tarifa mensal for maior, então calcular CCV das duas alternativas

1.5.1. Se o tempo de retorno para o uso do forno elétrico for maior que o desejado, então a utilização do forno à gás é viável.

.....1.5.2. Se o tempo de retorno para o uso do forno elétrico for menor que o desejado, então a utilização do forno à gás é inviável.

2. Se já existe instalado um forno elétrico:

2.1. Se a tarifa mensal de gás é maior que a tarifa de energia elétrica, então a substituição é inviável.

2.2. Se a tarifa mensal de gás é menor que a tarifa de energia elétrica, então calcular CCV.

2.3. Se o CCV do forno à gás for menor que o do forno elétrico no tempo de retorno estipulado, então substituição é viável.

2.4.Se o CCV do forno à gás for maior que o do forno elétrico no tempo de retorno estipulado, então substituição é inviável.

## **5. Análise da metodologia**

A metodologia presente neste estudo mostrou alguns pontos fortes e outros de difícil realização prática. Serão agora avaliados os pontos um a um.

1. Escolha do Segmento Industrial: A escolha do segmento, com base nos estudos feitos anteriormente em âmbito nacional é relativamente simples, mas diversos fatores podem ser definidos para tal escolha, tornando-a um tanto subjetiva.
2. Análise da Planta Industrial e do Consumo de Energia Elétrica: No presente estudo, foi possível ter acesso irrestrito à planta e aos dados de consumo de energia, mas nem sempre todos os dados necessários estão disponíveis, como, por exemplo, as placas dos fornos que não estavam mais em seus devidos lugares e a placa do banco de capacitores de entrada, que era ilegível.
3. Verificação do consumo energético: geralmente é difícil conseguir ler as placas no planta, portanto o jeito mais preciso para obterem-se os valores é através de medições. No presente estudo, tais valores foram calculados a partir dos dados obtidos.
4. Cálculo do Rendimento do processo: O cálculo do rendimento é precedido, necessariamente de medições de consumo de energia durante um ciclo, mas tais medidas não são simples de serem realizadas e para pequenas variações de carga têm-se variações no valor obtido.

5. Verificação da qualidade do produto: Para isso, devem ser lidos os estudos feitos sobre o tema e tomadas as providências que garantam a segurança da substituição neste quesito.
6. Cálculo do Custo da Energia: Esta etapa é a mais importante do processo pois nela serão determinados efetivamente os valores que viabilizam ou não a substituição.
7. Estudos de adaptação da planta elétrica: No caso, devem ser analisadas as instalações físicas, assim como as conexões elétricas e de tubulação a gás para eventual conexão. Na planta, a possibilidade de conexão com a Comgás era real, pois o gasoduto se localizava nas proximidades do local.
8. Cálculo do custo da infra-estrutura: no final das contas, observando que a distribuidora de gás arca com os custos da tubulação e as distribuidoras de ar propanado arcaram com o armazenamento deste, a única coisa que deveria ser feita pela indústria é construir os dutos internos.
9. Comparação do consumo energético com o consumo de uma usina térmica que gerasse a energia necessária para alimentar um processo equivalente além de custos e emissões; essa etapa não foi realizada, mas pode ser estimada através da consideração da quantidade de emissões gerada por uma usina térmica ponderada pela sua participação na matriz elétrica nacional. Com tal gasto energético, avalia-se o gasto do forno a gás e quanto da eletricidade que alimenta o forno tem as emissões acima citadas associadas e faz-se a comparação.

## **6. Conclusões e Sugestões**

Com este estudo, pode-se fazer uma avaliação da metodologia proposta e que foi seguida. Foram avaliadas antes mesmo da apresentação da metodologia o ramo industrial que foi escolhido e as razões da escolha, além das considerações sobre a qualidade do produto. Alguns pontos, como cálculo do rendimento e avaliação da qualidade do produto mostraram-se mais trabalhosos para análise. Feitos os levantamentos dos equipamentos, dos custos envolvidos, das características técnicas destes e das tarifas, pode ser calculado o Custo do Ciclo de Vida e a Taxa Interna de Retorno de cada uma das alternativas, cálculo que mostra a sensibilidade da avaliação a parâmetros como custo da energia e rendimento dos processos. Com isso, a metodologia mostrou-se eficaz na avaliação da substituição, apesar de ainda restar o teste da alternativa sobre emissões. Além disso, a análise do problema real forneceu os parâmetros de entrada e regras suficientes para o início da construção do sistema especialista, que poderá facilmente ser aumentado para uma análise mais abrangente da planta, considerando-se, por exemplo, a utilização de calor residual do processo para pré-aquecimento, ou avaliação da possibilidade de co-geração.

## **7. Bibliografia**

1. Aldabó R., Qualidade na Energia Elétrica. Ed. Art Líber, 2001, São Paulo.

Cardoso, J. J. Eletrotermia: fornos elétricos a arco, Esc. Minas da UFOP.

Ouro Preto, 1987.

2. Dentzien Dias, G. A. Energia: harmônicas em sistemas industriais. Ed.

PUCRS 2001.

3. PSI 2316 – Laboratório de Eletricidade II – Apostilas de Laboratório –

PSI/EPUSP, 2005.

4. PTC 2307 – Sistemas e Sinais – Apostila Teórica, 2005

5. Burani, G. F.; Udaeta, M. E. M.; Kanayama, P.; Affonso, ° F.; Oliva, C. R.

R.; Uso racional da energia Dentro de Uma Indústria Metalúrgica:

Oportunidade de Troca de Eletricidade para Gás Natural – Artigo Técnico –

Rio Oil & Gás Expo and Conference, Rio de Janeiro 2006.

6. Strohaecker, T. R. (coord.) - Manual Orientativo para Conversão de

Fornos para Emprego de Gás Natural – UFRGS, Porto Alegre 2003.

7. Fernandes, F. Metodologia para escolha de segmentos Industriais para

Substituição da Eletrotermia por Gás – Artigo Técnico – 3º Congresso

Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador 2005.

8. Strapasson, A. B., A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência

Energética – Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético –

Tese de Mestrado – PIPGE(IEE/POLI/FEA/IF) –USP, São Paulo 2004.

1. Mamede,J. F., Instalações Elétricas Industriais, Editora LTC, São Paulo 2001.
11. LEVINE R. I.; DRANG, D. E.; EDELSON, B.; Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas – Aplicações e Exemplos práticos, McGraw Hill, São Paulo, 1988.
12. COMGÁS [www.comgas.com.br](http://www.comgas.com.br) (acessado em 8 de junho de 2007)
13. ELEKTRO [www.elektro.com.br](http://www.elektro.com.br) (acessado em 8 de junho de 2007)
14. MME – DNAEE, Programa de Substituição de Energéticos Importados por Eletricidade, Brasília, 1984.
15. Hirschfeld, H.; Engenharia Econômica e Análise de Custos, Editora Atlas, São Paulo, 2000.