Apêndice A

Fornos a Arco

A.1 FORNOS ELÉTRICOS A ARCO NO BRASIL

Nos últimos 20 anos, o uso do forno elétrico a arco (FEA) para a produção do aço cresceu consideravelmente. Houve muitas razões para este crescimento, sendo que todas estão diretamente relacionadas ao custo do produto primário e aos avanços na tecnologia. Tomando por base um custo médio da energia elétrica como sendo entre 68 a 72 U\$/Mwh o custo específico por tonelada da capacidade anual instalada varia geralmente na escala de U\$140 a 200 por tonelada para uma operação baseada em FEA. Para um autoforno similar, baseado na operação, o custo específico será de aproximadamente U\$1000 por tonelada. Como conseqüência, as operações baseadas no FEA moveram-se gradualmente para as áreas onde a produção era anteriormente realizada pelo processo da redução do minério. A primeira destas áreas era a de produtos longos - barras reforçadas e barras comerciais. E, posteriormente, pelos avanços na área "estrutural pesada" e chapas; mais recentemente na área de produtos lisos com os avanços da "laje moldada fina" (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1998).

Atualmente, aproximadamente 40% do aço produzido na América do Norte são feitos utilizando-se os FEA's. Com os produtores de FEA's atentos aos avanços das fábricas integradas, diversas modificações vêm sendo feitas: tal como níveis residuais no aço (essencialmente os elementos contidos no aço que não são removidos durante o derretimento ou refino) e em gases dissolvidos no aço (nitrogênio, hidrogênio, oxigênio).

Os primeiros fornos a arco instalados no Brasil datam da década de 40 e considerável crescimento no número de instalações foi notado nos anos 70. Nos últimos 10 anos, os investimentos nesta área se concentram na modernização dos equipamentos existentes, visando maior produtividade e qualidade, tanto dos produtos finais como das condições ambientais. A Tabela A.1 mostra os principais fornos elétricos a arco instalados no Brasil.

| DADOS DO FORNO | | | | DADOS DO TRANSFORMADOR | | | |
|----------------|------|------------|--------|------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| USUÁRIO | Ano | Fabricante | Capac. | Fabricante | Potência Nominal | Tensão Primária | Tensão Secundária |
| BARRA | 1980 | DEMAG | 50,0 | ABB | 30,0 | 23,0 | 195/630 |
| MANSA | 1980 | DEMAG | 50,0 | ABB | 30,0 | 23,0 | 195/630 |
| COFAVI | 1984 | DEMAG | 70,0 | TUSA | 40/48 | 33,0 | 446/520 |
| COSIGUA | 1980 | DEMAG | 100,0 | DEMAG | 75/84 | 33,0 | 521/900 |
| | 1982 | DEMAG | 100,0 | DEMAG | 75/84 | 33,0 | 521/900 |
| GUAIRA | 1982 | LECTROMELT | 70,0 | TUSA | 75/84 | 33,0 | 434/750 |
| HIME | 1980 | ABB | 50,0 | TUSA | 75,9 | 34,5 | 520/750 |
| USIBA | 1973 | STEIN | 120 | ABB | 76,0 | 30,0 | 614/833 |

Tabela A.1 - Principais fornos instalados no Brasil

A.1.1 Constituição esquemática de um forno a arco

A Figura A.1 mostra as partes principais do sistema de transmissão de energia desde o transformador até os eletrodos de um forno elétrico a arco.

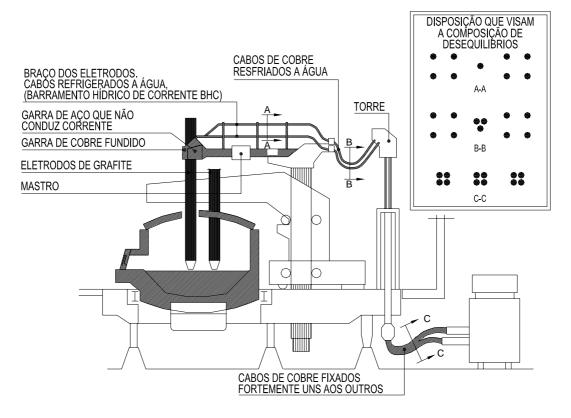


Figura A.1 - Constituição esquemática de um forno elétrico a arco.

O ponto de conexão do triângulo é locado no topo da torre, próximos aos barramentos, o que significa fazer o comprimento dos condutores menor, enquanto que ao mesmo tempo os cabos flexíveis podem ser facilmente dispostos, permitindo aos braços dos eletrodos moverem-se livremente.

A torre que suporta cada barra consiste em um mastro para cada fase intercalada com barras de alumínio ou cobre apoiadas através de isolamentos apropriados à estrutura. A corrente é conduzida até o topo da torre através de cabos de cobre conectados aos terminais do secundário do transformador. Estes cabos absorvem o movimento do forno durante a descida dos eletrodos.

O sistema da Figura A.1 possui, como mostrado, quatro cabos fixados uns contra os outros (seção C-C), para cada fase.

Uma vez que as correntes de cada fase compensam umas as outras, a reatância será menor. Uma outra vantagem é que os cabos não estão sujeitos às forças devido à corrente e, conseqüentemente, não oscilam muito durante a operação.

Os cabos do topo da torre de barras até os braços do eletrodo são mantidos juntos na fase média (interna) e separados nas fases externas, como mostrado na seção B-B da Figura A.1, para que ocorra um melhor equilíbrio entre as correntes das diversas fases. Estes cabos são normalmente de cobre resfriados à água.

Nos braços do eletrodo a corrente é conduzida através de barras refrigeradas á água, como pode ser visto na seção A-A da Figura A.1, onde nas fases externas existem quatro tubos enquanto que na fase do meio apenas um. Este barramento é chamado de "barramento hídrico de corrente" (BHC). A Figura A.2, mostra os detalhes do sistema de fixação dos eletrodos em um forno elétrico industrial.

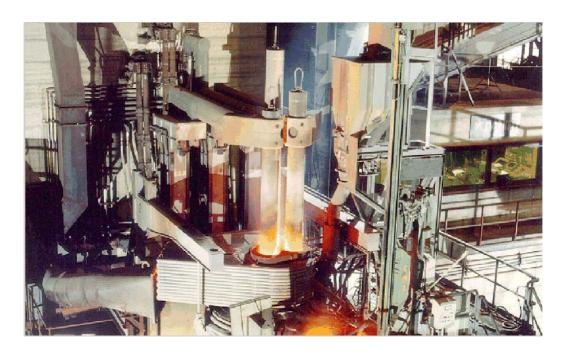


Figura A.2 - Sistema de fixação de eletrodos de um forno elétrico a arco.

Finalmente, nos fixadores do eletrodo a corrente é transferida ao eletrodo de grafite via duas garras de cobre fundido. O eletrodo é pressionado contra essas garras de cobre por uma garra de aço que não conduz corrente, para evitar superaquecimentos.

A Figura A.3, mostra a vista de um forno a arco industrial.



Figura A.3 - Vista de um forno elétrico a arco industrial.

A.2 DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA NO BRASIL

Na década de 70, ocorreu uma forte inflexão no ritmo de crescimento da demanda mundial de aço, que, entre 1946 e 1973, dava sustentação a um crescimento médio de produção da ordem de 7% ao ano (HITOTSUBASHI UNIVERSITY, 2006).

A existência de um grau elevado de capacidade produtiva permanentemente ociosa caracterizava a indústria siderúrgica mundial desde a segunda metade da década de 70 até início de 2001.

O volume de aço bruto produzido em 2001 (847,7 Mton/ano) foi apenas 17,6% superior àquele registrado em 1973 (698,1 Mton) perfazendo uma taxa média anual de crescimento de apenas 0,6% no período.

Embora venha experimentando forte concorrência de materiais alternativos, como plásticos e alumínio, o aço ainda é a principal fonte de material básico da indústria, especialmente aquela ligada a bens de consumo duráveis e a bens de capital.

Desde a década de 90, a siderurgia brasileira vem se mantendo entre a oitava e a nona posições relativas no mundo, com produção equivalente a cerca de metade do total da América Latina e a 3% do volume mundial (INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS, 1990).

Ocorreu uma retração de 4% na produção de aço, em 2005, num quadro de ajustes dos estoques, que se encontravam elevados nos consumidores e distribuidores. No entanto, deve-se ressaltar que esta redução na produção foi devido a forte retração no mercado brasileiro, tendo as importações crescido em torno de 4%.

A.2.1 Evolução tecnológica

Os principais insumos empregados na fabricação do aço são: o minério de ferro, o carvão, a sucata e a energia elétrica. A importância relativa desses insumos varia de acordo com a rota tecnológica adotada em cada usina. Nas usinas

integradas clássicas prevalecem o carvão mineral e o minério de ferro. Nas semiintegradas, o destaque cabe à sucata (PINHO e LOPES, 2000).

As usinas integradas promovem a transformação do minério de ferro em produtos siderúrgicos semi-acabados ou acabados (laminados). Tradicionalmente, isso requer coquerias, altos-fornos, aciaria e laminadores. O processo produtivo integrado compreende três fases distintas:

A primeira é denominada redução e seu objetivo principal é transformar o minério de ferro - encontrado na natureza geralmente sob a forma de óxido de ferro - em ferro-gusa. Os equipamentos obrigatórios nesta etapa são a coqueria, que transforma o carvão mineral em coque, e o alto-forno, cujo produto final é o ferro-gusa;

A segunda fase, o refino, processa a produção do aço propriamente dito em aciarias e realiza sua solidificação. O refino do aço é realizado em conversores a oxigênio por meio de transformações químicas endotérmicas que utilizam como fonte de energia o próprio calor proveniente do gusa líquido. Os objetivos precípuos desta etapa de refino são: o ajuste da quantidade de carbono ou outros elementos de liga à proporção necessária para a obtenção das propriedades desejadas e a redução para quantidades aceitáveis de elementos residuais, como enxofre, nitrogênio e oxigênio.

O processo mais difundido de solidificação é o lingotamento contínuo, desenvolvido na década de 50, que desde então vem substituindo o lingotamento convencional. O lingotamento contínuo propicia um grande aumento na economia de energia e sensível aumento de rendimento do material entre as etapas de refino e laminação, pois elimina um ou mais estágios de reaquecimento de materiais semi-acabados.

A laminação, que transforma produtos semi-acabados (placas, blocos e tarugos) em produtos acabados, constitui a terceira fase do processo produtivo integrado. Além do minério de ferro e do carvão, a rota tecnológica integrada requer o uso de fundentes: como o calcário nos alto-fornos e de oxigênio líquido nos conversores. A Figura A.4 mostra o processo siderúrgico de uma usina integrada.

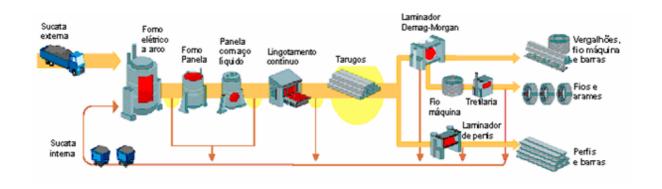


Figura A.4 - Fluxograma do processo siderúrgico de uma usina integrada.

O processo produtivo das usinas semi-integradas compreende apenas as duas últimas etapas, quais seja o refino e a laminação e utiliza a sucata ferrosa como insumo básico. Nestas usinas, a depuração química da carga metálica é realizada em fornos elétricos a arco, tendo a eletricidade como fonte de energia preponderante. Considerando-se que a matéria-prima empregada, a sucata ferrosa, já conta com o carbono em sua constituição, nem mesmo do ponto de vista da composição química é necessária a utilização do carvão mineral.

Após a fabricação de aço, este é laminado à semelhança do que ocorre nas usinas integradas. As usinas que operam segundo este processo são também denominadas mini-mills (mini-usinas), designação que ressalta o caráter mais compacto da produção semi-integrada e a escala mínima bastante inferior a das usinas integradas. A capacidade de operar eficientemente em menor escala é decorrência direta da possibilidade de se dispensar os altos-fornos, equipamentos extremamente propensos a retornos crescentes de escala. A indivisibilidade representada pela operação dos altos-fornos a coque impõe às usinas integradas um tamanho mínimo de pelo menos 3 Mton/ano, ao passo que as mini-usinas operam competitivamente com escalas de 250 Mton/ano no segmento de aços não-planos e de 1 Mton/ano na produção de planos. A Figura A.5 mostra a diferença do processo de fabricação de uma Usina integrada a Coque e o fluxo indicativo de uma Usina semi-integrada.

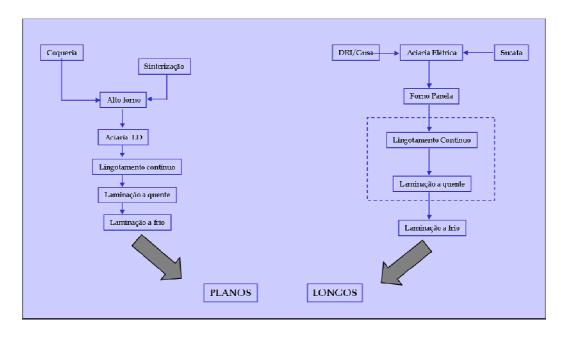


Figura A.5 - Fluxo indicativo de usina integrada a coque (esquerda) e de uma usina semi-integrada (direita).

A Tabela A.2 mostra as melhores tecnologias em termos de consumo energético (FRUEHAN et al., 2000). Nota-se que a utilização de 100% de sucata é a melhor opção de economia energética, pois é um processo de reciclagem, que diminui o impacto ambiental, mas é importante observar o ciclo de vida do aço na economia e logo não é possível utilizar-se apenas desta tecnologia.

Tabela A.2 - Mínima energia para produção de aço em diversos processos

| Processo | Produto | Laminação | Energia (MJ/ton) |
|------------------------|-----------------------|---------------|------------------|
| Alto-forno - Conversor | Chapa laminada a | Direto | 7.878 |
| a Oxigênio | quente | Reaquecimento | 8.703 |
| Alto-forno - Conversor | Chana laminada a fria | Direto | 7.895 |
| a Oxigênio | Chapa laminada a frio | Reaquecimento | 8.720 |
| Forno Elétrico a Arco | Chapa laminada a | Direto | 1.341 |
| (Sucata) | quente | Reaquecimento | 2.166 |
| Forno Elétrico a Arco | Chana laminada a fria | Direto | 1.358 |
| (Sucata) | Chapa laminada a frio | Reaquecimento | 2.183 |
| Forno Elétrico a Arco | Chapa laminada a frio | Direto | 6.081 |
| (50% DRI) | Спара іапіпаца а піо | Reaquecimento | 6.906 |
| Forno Elétrico a Arco | Barra | Direto | 1.345 |
| (Sucata) | Dalla | Reaquecimento | 2.170 |
| Forno Elétrico a Arco | Barra | Direto | 6.068 |
| (50% DRI) | Dalla | Reaquecimento | 6.893 |

A.3 SISTEMA DE COGERAÇÃO DA COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL

A Usina Presidente Vargas, em Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro, conta com capacidade para produzir 5,8 milhões de toneladas anuais de aço bruto, demanda de aproximadamente 380 MW e um consumo de energia mensal médio em torno de 250.000 MWh. A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) é a terceira maior produtora de aço do Brasil (COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2006).

A CSN era a empresa privada brasileira que mais gastava com despesas de energia. A Central Termoelétrica de Cogeração de Energia da CSN (CTE), inaugurada em dezembro de 1999, resultado de um investimento de US\$300 milhões financiados pelo BNDES, com capacidade firme de 230 MW, economiza US\$ 33 milhões por ano, sem contar o suprimento de eletricidade e outros energéticos com alta confiabilidade.

A CTE gera até 238 MW, o que corresponde a cerca de 60% das necessidades de energia elétrica da Usina Presidente Vargas, e produz vapor de processo e ar soprado utilizados nas linhas de laminação e coqueria e nos altofornos.

Além disso, possibilita a ampliação da oferta de energia elétrica no país e fortalece o Sistema Elétrico Interligado, auxiliando o suprimento de energia, sobretudo na região sudeste do Brasil.

A CTE é uma planta de ciclo "Rankhine", abastecida com o gás de coque do alto-forno, gás de aciaria e gás de coqueria, que são rejeitos altamente energéticos da produção siderúrgica. Anteriormente à CTE, os gases eram queimados por três queimadores industriais ("flares"), contribuindo, portanto para a emissão de gases que criam o efeito estufa. Com a instalação da CTE, os gases resultantes da usina são queimados em suas caldeiras e transformados em vapor para produzir energia e ainda servem às linhas de laminação, alto-forno, coqueria e aquecimento. Para estabilização das chamas nas caldeiras, a queima é complementada com uma parcela de gás natural.

A.4 EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SIDERÚRGICA BARRA MANSA

Situada na cidade de Barra Mansa (RJ), a Siderúrgica Barra Mansa (SBM) é a terceira maior produtora de aços longos do país. Atualmente, a SBM tem capacidade instalada de produção de aço em torno de 530 mil toneladas por ano. A empresa planeja duplicar sua capacidade instalada nos próximos anos.

O aço, produzido na SBM, é obtido a partir da fusão de dois tipos de carga sólida - sucata e ferro-gusa. Cerca de 70% da matéria-prima vêm da sucata de aço - produtos descartados por obsolescência e sobras de processos industriais - e os 30% restantes são formados por ferro-gusa.

A evolução da produção de aço em uma aciaria elétrica pelos dois processos descritos pode ser visto na Figura A.5. Em junho de 2003, deu-se início a partida ("start-up") do lingotamento contínuo em substituição ao lingotamento convencional, começando a operação em ritmo no final daquele ano. No mês de junho, nota-se uma piora na eficiência energética devido a este início de operação. Como pode ser vista, nas Figuras A.6 e A.7, houve uma melhora significativa na eficiência energética com a entrada do lingotamento contínuo.

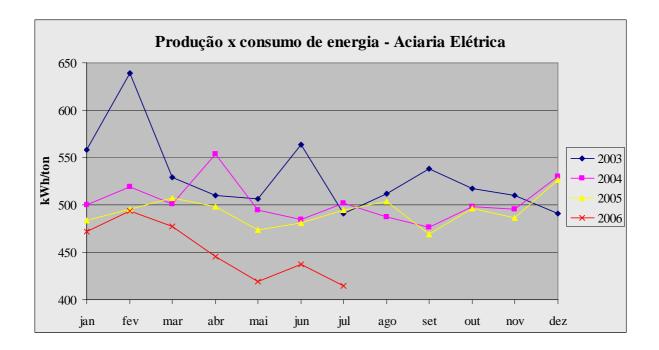


Figura A.6 - Produção x consumo na aciaria elétrica da Siderúrgica Barra Mansa.

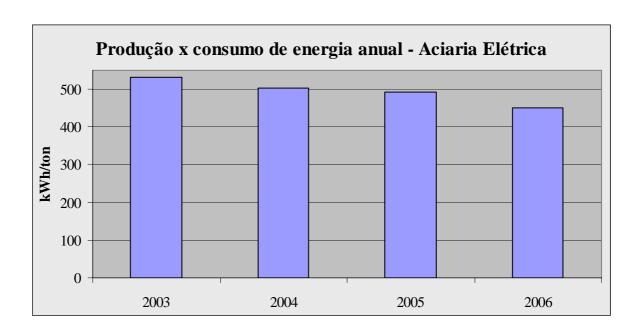


Figura A.7 - Produção x consumo anual na aciaria elétrica da Siderúrgica Barra Mansa.

Em dezembro de 2004 e janeiro de 2005, percebeu-se na SBM um maior consumo de energia elétrica por tonelada de aço produzido por ser um mês de baixo volume de vendas. Com isto, foi possível observar que o processo é mais eficiente quanto melhor utilizada a sua capacidade produtiva. Em 2006, devido a otimização do tempo de ciclo de produção, obtida principalmente com medidas operacionais e a absorção completa da produção pelo mercado, observa-se uma melhora considerável da relação kWh/ton. Durante o ano de 2006, foi batido recorde de produção em maio e, em seguida, em julho, e a eficiência energética tem melhorado gradativamente como mostra a Figura A.7.

Em outubro de 2001, foi realizado o "start-up" da modernização do laminador a quente de aço longo. Devido à complexidade envolvida, o laminador ainda não alcançou a produtividade máxima do projeto, mas estão sendo realizadas melhorias contínuas no processo, que também acarretam em melhorias na eficiência energética, como pode ser visto nas Figuras A.8 e A.9. Os projetos mais importantes foram:

- Em junho de 2003, foi trocada a gaiola desbastadora, melhorando a disponibilidade do equipamento;
- No final de 2003, foi implementado e melhorado o processo de produção por separação do vergalhão de aço ("slitting") em dois veios na bitola de 12,5 mm;

 Em março de 2005, foram concluídas as modificações para laminação de tarugos de 880 Kg em substituição aos tarugos de 700 Kg;

- Em abril de 2006, foi feita uma modificação no sistema de tratamento térmico, conseguindo maior vazão de água, e assim foi possível aumentar a produtividade dos vergalhões de aço nas bitolas de 20 e 25 mm, sendo a primeira vez que foi alcançada a produtividade máxima de projeto de 80 toneladas por hora;
- Em junho de 2006 foi implementado o processo de produção por "slitting" em dois veios na bitola de 16 mm.

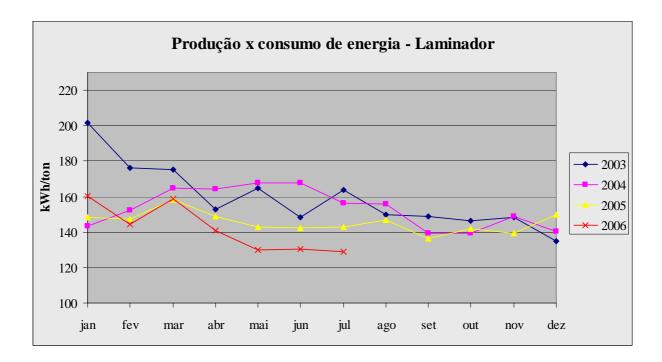


Figura A.8 - Produção x consumo na laminação a quente de aço longo na Siderúrgica Barra Mansa.

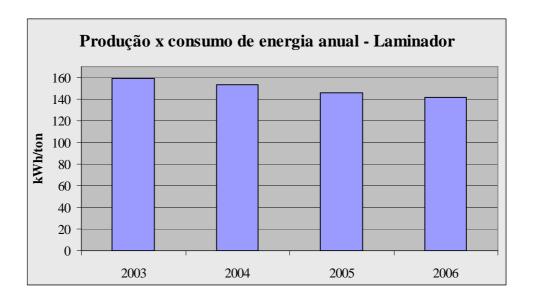


Figura A.9 - Produção x consumo anual na laminação a quente de aço longo na Siderúrgica Barra Mansa.

Como pode ser visto na Figura A.10, os equipamentos que mais consomem na produção, refino e laminação de aço são os fornos elétricos a arco (FEA), responsáveis por cerca de 60% do consumo total. Vale ressaltar que FEA's são os equipamentos de produção de aço que possuem a melhor relação entre o consumo e a produção conforme mostrado no item A.2.1.

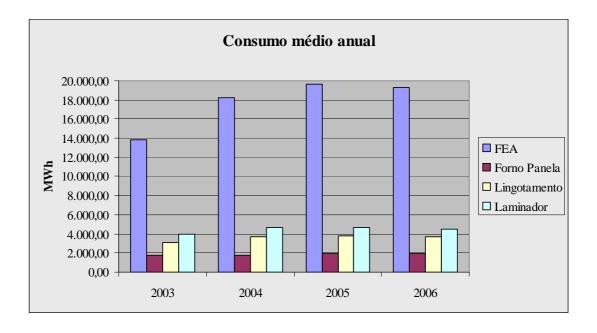


Figura A.10 - Consumo médio anual das principais áreas na produção, refino e laminação de aço na Siderúrgica Barra Mansa.

Analisando os FEA's da Siderúrgica Barra Mansa com relação às medidas de conservação de energia atuais, foi constatado que algumas destas medidas já estão implementadas, mas ainda existem outras que poderiam contribuir para a melhora na eficiência energética.

Medidas já implantadas:

- Cortinas de ar.

Durante o sopro de oxigênio, há grande infiltração de ar frio pela porta de trabalho. Esta infiltração implica maiores perdas de energia via gases aspirados e maior consumo de eletrodos por oxidação da superfície lateral.

Utilizando uma cortina de ar na porta de trabalho a infiltração foi diminuída. Isto resultou em uma diminuição de aproximadamente 3,3% no consumo de energia elétrica.

- Controle computadorizado do processo.

Alto grau de utilização e baixos custos de matéria-prima e energia são os principais objetivos de uma operação econômica de fornos elétricos a arco. O controle computadorizado mostrou-se como uma importante ferramenta para contenção dos custos de matéria-prima, energia e eletrodos e para redução do tempo "tap-to-tap".

Um sistema de controle de processo de fusão e refino em forno elétrico a arco pressupõe um modelo metalúrgico e um térmico acoplado. Os fornos, em estudo, já possuem este sistema que auxilia na melhor utilização da sua capacidade de forno.

A automação em fornos elétricos a arco visa basicamente ao perfeito controle da fusão através do cálculo e a distribuição correta da energia a ser fornecida à carga, fazendo com que a fusão completa se processe em menor tempo possível.

Cada cesto de sucata carregado no forno tem seu próprio programa de fusão em função do tipo e composição da carga, o que possibilita prever com precisão o montante de energia requerida, evitando falta ou excesso que resulte em perdas.

O cálculo da posição do comutador do forno, correntes e posição do disjuntor é baseado nas variações de tensão da rede e pelo controlador de demanda. Os sistemas instalados permitem os seguintes estágios de controle:

- Controle do estágio de fusão;
- Controle do estágio de vazamento;
- Aquisição de dados e geração de relatório.

Na fase de fusão, o sistema controla os instantes de mudanças de nível de tensão, indica os instantes de carregamento posteriores e instrui o operador sobre os ajustes de corrente. Antes do vazamento, o controle indica as necessidades de fornecimento de energia. Pode-se utilizar um dispositivo a base de PLD ("Programmable Logic Device"), visando auxiliar na escolha de tensão de alimentação do transformador do forno, maximizando o tempo total de fusão da carga.

Alguns eventos e parâmetros do processo de fusão são automaticamente registrados, por exemplo: consumo de energia e oxigênio, tempo de vazamento, análises de laboratórios, etc. Outros eventos, por exemplo, carregamentos, são introduzidos através do teclado de operação. Os dados coletados são processados e mostrados em figuras: do processo, relatórios de corrida e relatórios periódicos. A otimização da operação dos FEA's proporciona a redução no tempo total das corridas e no consumo de energia elétrica necessária para o processo de fusão do aço.