

# ESTUDO SOBRE OS FATORES QUE INFLUENCIAM NAS CONDIÇÕES TÉRMICAS DO ALTO-FORNO PROVENIENTES DAS VARIAÇÕES NO PROCESSO DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM ALTOS- FORNOS<sup>1</sup>

Leonardo César Sobreira<sup>2</sup>  
Washington Luis Vieira da Silva<sup>3</sup>  
Carolina C. Guimarães<sup>4</sup>  
Paulo Santos Assis<sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo determinar quais fatores influenciam nas condições térmicas do Alto-Forno mediante as variações na injeção de carvão pulverizado. É observado no processo que estas variações descritas pelo gráfico de controle influenciam diretamente no produto final, o ferro-gusa, podendo elevar o custo e comprometer a qualidade do atendimento às especificações dos clientes. Além do objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos: realizar um estudo bibliográfico sobre injeção de carvão pulverizado e sobre controle de processo; estudar o processo de injeção de carvão da empresa pesquisada, com a finalidade de observar os possíveis fatores que influenciam nas variações; acompanhar o controle do processo em função dos gráficos para quantificar as variações; identificar as causas que influenciam as variações e, por fim, sugerir propostas de melhorias para o problema gerado nesta pesquisa. Além dos objetivos relatados, este trabalho se justifica por apresentar as possíveis contribuições: atender às especificações dos clientes mediante as condições térmicas do Alto-Forno; ganho energético; redução do custo em função de uma injeção de carvão pulverizado mais estável e solução das falhas de projeto e processo. Baseado nos resultados do estudo e no conhecimento prévio do sistema, pode-se afirmar que os seguintes fatores influenciam as condições térmicas: queda na pressão de N<sub>2</sub> de transporte do carvão; obstrução das lanças e linha de injeção de carvão; variações nas faixas granulométricas do carvão pulverizado; variações nas faixas de umidade do carvão; excesso de curvas na tubulação de transporte de carvão; revestimento da tubulação de carvão inexistente; qualidade química e física do carvão.

**Palavras-chave:** Alto-forno; Injeção de carvão pulverizado; Condições térmicas.

## ESTUDY OF FACTORS INFLUENCING ON BLAST FURNACE THERMICAL CONDITIONS ARISING FROM VARIATIONS OF PULVERIZED COAL INJECTION

### Abstract

The objective of this project is defining the factors which have influence in blast furnace thermal conditions by variations on pulverized coal injection. It is observed in the process that the variations described by the chart control have a direct influence on the final product, the pig iron, resulting in costs raised and customer's specifications commitment compromised. Besides the general goal, there are the following specific objectives: making a bibliographical study on pulverized coal injection and its process control, study the coal injection process of a specific company in order to observed the possible factors that have influence on variations, monitor the process control by graphics to quantify the variations and finally suggest improvements for the problem generated in this paper. Beyond the reported goals, this work is justified by the presentation of the possible contributions: achieve the customer's specifications by the thermal conditions in blast furnace, energy gain, cost reduction due to a pulverized coal injection process more stable and solutions for o project and processes failures. The discussions, based on results from the graphs and the system information, provide the identification of the following factors that have influence on the thermal conditions of the blast furnace: decrease of N<sub>2</sub> pressure for coal transportation; obstruction of lances and coal lines; variations of the particle size of pulverized coal; variations in the coal moisture; excessive bends on pipes for coal transportation; absence of pipe coating; chemical and physical characteristics of the coal.

**Key-word:** blast furnace, pulverized coal injection, thermal conditions.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Membro da ABM. Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat/UFOP.

<sup>3</sup> Membro da ABM. Doutorando em Engenharia de Materiais – Redemat/UFOP

<sup>4</sup> Membro da ABM. Graduanda em Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas – UFOP

<sup>5</sup> Membro da ABM e da AIST. Professor Titular da Escola de Minas – Prof. da Redemat- Prof. Honorário da HUST, Tangshan, China.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo vários trabalhos foram desenvolvidos sobre os altos-fornos (AF). Estudar os altos-fornos e sua operação se tornou de vital importância para a sobrevivência das empresas do setor metalúrgico. A proposta deste trabalho se resume em identificar por meio de gráficos de controle, os possíveis fatores que interferem nas condições térmicas, as quais propiciam um menor rendimento da produção do gusa, devido aos efeitos gerados com a perda de calor do forno. Assim, é necessário entender sobre os principais conceitos relacionados ao alto-forno, o carvão mineral e o processo de injeção de carvão pulverizado (ICP), para que se possa com o auxílio do conhecimento teórico, discutir os gráficos que representam a parte operacional deste equipamento, com o propósito de alcançar melhores índices operacionais naquele reator.

## 2 ALTO-FORNO

De acordo com Assis,<sup>(1)</sup> o alto-forno é um aparelho metalúrgico que continua sendo o principal equipamento para produção de ferro primário (ferro-gusa) no mundo, responsável por cerca de 90% do ferro primário produzido mundialmente. Usam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, dolomita e quartzo), variando de acordo com a capacidade do alto-forno.

Para Araújo,<sup>(2)</sup> a redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono presente no carvão com o oxigênio do ar aquecido soprado nas ventaneiras. Os produtos formados pela interação entre gases e matérias-primas são: escória, ferro-gusa, gases, poeira.

O corpo físico do alto-forno é dividido basicamente nas seguintes partes: goela, cuba, ventre, rampa e cadinho.<sup>(3)</sup>

Observa-se a existência de várias regiões no corpo físico do alto-forno, porém existem outras como as ventaneiras, por onde é injetado o ar quente, fonte de oxigênio para as reações e os materiais pulverizados. Essas são constituídas por peças de cobre refrigeradas a água, situadas na parte superior do cadinho abaixo da rampa. A importância das ventaneiras é evidenciada no estudo do processo de injeção de carvão pulverizado, que é o foco desse trabalho.

Segundo Fernandes,<sup>(4)</sup> a estrutura interna da carga dos altos-fornos só ficou bem conhecida com as experiências de dissecação, conduzidas inicialmente pelos russos e depois pelos japoneses. Estas experiências constaram do resfriamento de altos-fornos comerciais em condições normais de operação. Os fornos foram resfriados e dissecados. A partir dessas experiências, dividiu-se o alto-forno em cinco zonas distintas. São elas:

- zona granular, região onde toda a carga se encontra no estado sólido;
- zona de amolecimento e fusão (zona coesiva), região onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem;
- zona de gotejamento, onde o metal e a escória, já na forma líquida, escoam em contracorrente com os gases por meio de um empilhamento de coque parcialmente reagido, localizado logo abaixo da zona coesiva, que fornece coque para a combustão nas ventaneiras (zona ativa) e para o homem-morto (zona estagnante);
- zona do *raceway*, região altamente turbulenta em frente às ventaneiras e onde ocorre a combustão do carbono do coque da zona ativa com o oxigênio do ar

soprado. O raceway pode ser descrito como uma cavidade formada pelo efeito do jato de ar emergindo da ventaneira, na qual as partículas de coque são circuladas e recirculadas numa alta velocidade. Como a maior parte do coque que entra no forno é consumida e a maior parte dos gases redutores é produzida no raceway, o movimento da coluna de carga e a distribuição dos gases (portanto o desempenho do forno), são governados em uma certa extensão pelos parâmetros do raceway;

- zona de cadinho, composta pelo empilhamento de coque do homem-morto junto com a escória e gusa depositado no fundo do reator, que serão removidos do forno.

Neste item foi possível entender de forma geral sobre o alto-forno, seus componentes e o processo de funcionamento deste equipamento em função das cinco zonas discutidas anteriormente. O item a seguir, caracteriza o carvão mineral utilizado como matéria-prima no processo de obtenção de ferro gusa através do alto-forno.

## 2.1 Caracterização do Carvão Mineral

Para uma eficiência do processo de injeção de carvão pulverizado (ICP) no alto-forno deve-se utilizar como padrão do processo a caracterização do carvão, uma vez que determinadas propriedades deste material são de fundamental importância para o processo. A seguir são descritas algumas dessas características.

- *Teor de umidade*: com relação a este fator, pode-se dizer que um aumento da umidade do produto final provoca perda de calor na injeção e conseqüente aumento do consumo de carbono, além de poder provocar obstrução nas linhas de transporte pneumático, devido a aglomeração de material na tubulação.<sup>(5)</sup>
- *Moabilidade*: o HGI (Hardgroove Gindability Index – Índice de Moabilidade Hardgroove) é um número adimensional que reflete a facilidade de pulverização do carvão. Este índice é utilizado para avaliar o rendimento e a energia necessária nos processos de britagem e moagem. Altos valores para o HGI são desejáveis, pois indicam maior facilidade de pulverizar o carvão além de ajudar na eliminação dos voláteis.<sup>(5)</sup>
- *Material Volátil*: são substâncias formadas principalmente por carbono, hidrogênio e oxigênio (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos). Um aumento de materiais voláteis acarreta um abaixamento no percentual de carbono fixo.<sup>(2)</sup> Assim, seria desejável menor conteúdo de matéria volátil, porém, carvões minerais de mais alto grau de carbonificação e conseqüentemente menor conteúdo de voláteis, possuem menor combustibilidade, ou seja, maior teor de voláteis implica em maior reatividade. Em contrapartida, aumentando-se o conteúdo de materiais voláteis, gera-se um grande volume de gases, causando instabilidade de combustão e maior degradação do coque que, pode se acumular entre a zona de combustão e o homem morto, formando o *bird's nest* (ninho de pássaro) na região do *raceway*. Um aumento muito acentuado do *bird's nest* (Figura 2) favorece ao fluxo periférico de gases aumentando as perdas térmicas.<sup>(5)</sup>

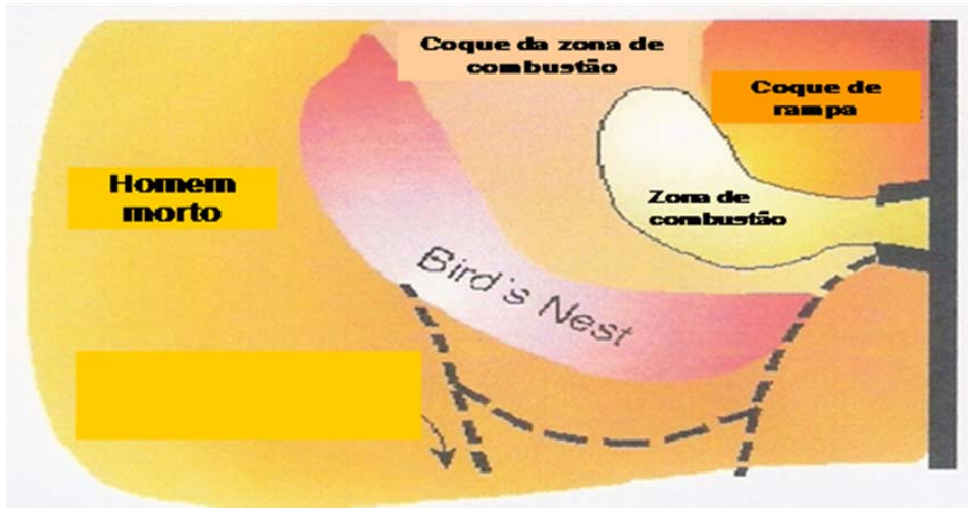


Figura 1: Figura esquemática do *Bird's Nest*.<sup>(5)</sup>

- **Teor de enxofre:** Os teores de enxofre variam de 1% a 10% em massa na composição do carvão, mas usualmente são injetados carvões com menos de 1% de enxofre (Brasil). O alto teor de enxofre pode ocasionar aumento do volume de escória, o que acarreta maior custo de dessulfuração, e também implica em possível modificação da basicidade binária.<sup>(1)</sup> O carvão brasileiro ocupa a quinta colocação entre os carvões latino-americanos em teor de enxofre.<sup>(6)</sup>
  - **Teor de álcalis:** Os álcalis são parcialmente reduzidos a K (potássio) e Na (sódio) na parte inferior do forno, estes são elevados pelo fluxo de contra corrente e reoxidam a formas líquidas/sólidas descendo com a carga. O processo cíclico aumenta a reatividade do carvão e deixa uma acumulação de compostos de K e Na no forno que restringe o fluxo de gás através de carga. O alto teor de álcalis pode também deteriorar a parede refratária do forno.<sup>(5)</sup>
  - **Teor de cinzas:** As cinzas são resultado da completa incineração do carvão. Com o aumento do teor de cinzas, aumenta-se a quantidade de escória formada, diminuindo a produtividade do gusa. Pode ocorrer também a formação do clínquer, que é a mistura de fundidos e não queimados, e escorificação de cinzas a altas temperaturas. A composição das cinzas é fator importante já que seus componentes podem influenciar na reatividade.
- Diante da caracterização do carvão a ser pulverizado, o próximo passo é entender o processo de injeção.<sup>(5)</sup>

## 2.2 Processo de Injeção de Carvão Pulverizado (ICP)

O processo de injeção de carvão pulverizado tem como objetivo a diminuição do consumo específico de reductor carregado pelo topo, tendo assim uma maior produção por um menor custo. Por este motivo, tem sido de interesse de muitas empresas integradas (ou não integradas) do setor siderúrgico a execução deste processo.

Para que se possa trabalhar com ICP, é necessária a construção de uma planta de secagem/moagem do carvão, visto que este deve ser pulverizado para que seja possível seu processamento nas zonas inferiores do AF.

Segundo Assis,<sup>(6)</sup> este processo iniciou-se no Brasil definitivamente em 1982, quando a ICP foi incorporada à prática operacional do AF 2 da Acesita. Desde então outras empresas passaram a aderir ao processo de ICP.

### 2.2.1 Principais conceitos: ICP, princípios, efeitos e instalações

Para que se possa injetar carvão pulverizado em altos-fornos é necessário cuidar de alguns parâmetros essenciais como: granulometria, umidade e instalação da planta de moagem/secagem do carvão. O carvão deve ser pulverizado respeitando-se um valor padrão para a granulometria, para que não ocorra queima durante o transporte e não interfira negativamente na zona de combustão e na região do homem morto. O carvão pulverizado deve passar por um processo de secagem visto que este causa um efeito refrigerante na zona de combustão. Caso contrário haverá problemas tanto com a temperatura de chama, quanto com a obstrução do sistema de transporte. No caso da instalação da planta de moagem e secagem do carvão, deve-se atentar para o sistema de transporte, pois havendo muitas curvas na tubulação, o carvão pode sofrer grande turbilhamento e perder velocidade ao colidir com as paredes dos tubos facilitando a obstrução destes, ou eventualmente acelerar perfurações nas tubulações.

A injeção de carvão pulverizado possibilita a substituição de parte do carvão vegetal ou coque carregado no topo do alto-forno mantendo-se o equilíbrio térmico do reator, o que traz benefícios e vantagens para o custo final do produto e por consequência acarreta alterações nos parâmetros operacionais. Alguns destes podem ser citados como relevantes para o processo, como o aumento do volume de gases na parte inferior do forno provenientes dos voláteis contidos no carvão pulverizado.

### 2.2.2 Controle operacional

Considerando um equilíbrio dinâmico e térmico no interior do alto-forno deve-se operar e analisar os efeitos da injeção, sempre alterando parâmetros como temperatura de sopro, injeção de vapor, umidade do ar soprado e enriquecimento do ar soprado com oxigênio. Estes quatro parâmetros combinados, ou não, são os principais usados para efeito de controle da temperatura adiabática de chama.

Podem-se analisar os efeitos da ICP em vários pontos, sendo os principais: temperatura de chama, permeabilidade, produção e qualidade do gusa.

Como o carvão tem efeito refrigerante, este tende a abaixar a temperatura de chama, e para compensar esse efeito, deve-se elevar a temperatura de sopro ou por meio do enriquecimento de oxigênio ou ainda pela desumidificação do ar soprado/injeção de vapor, ou utilizar a combinação dessas técnicas relatadas anteriormente no processo.

Quando se trata da permeabilidade pode-se dizer que um dos efeitos da ICP é o aumento da relação minério/coque, implicando no aumento da degradação do coque até as regiões mais inferiores do AF, comprometendo assim, a permeabilidade do cadinho. Este problema pode ser amenizado com maior acompanhamento da carga e com a melhora da resistência do coque, avaliada pelo índice de degradação (CSR: *Coke Strength after Reactivity*) e pela sua reatividade.

O processo de moagem de carvão para injeção em altos-fornos requer cuidados especiais devido a sua grande significância no processo de produção de ferro-gusa, uma vez que este processo pode acarretar problemas graves e irreversíveis. Para isso, deve haver um controle minucioso de todas as etapas do processo.



### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho é de caráter semi-quantitativo apresentando pesquisas dos tipos exploratória, bibliográfica e estudo de caso. A área de atuação da pesquisa é em uma empresa do setor siderúrgico. O procedimento utilizado nesta pesquisa está pautado na análise gráfica dos parâmetros que controlam o processo de ICP, fornecidos pela sala de controle de um AF, são eles:

- volume de carvão injetado;
- vazão de nitrogênio para injeção de carvão;
- pressão de  $N_2$  da linha de injeção de carvão; e
- pressão de nitrogênio de limpeza das linhas de injeção.

Vale salientar que os parâmetros citados são fundamentais para o controle do processo de injeção de carvão pulverizado.

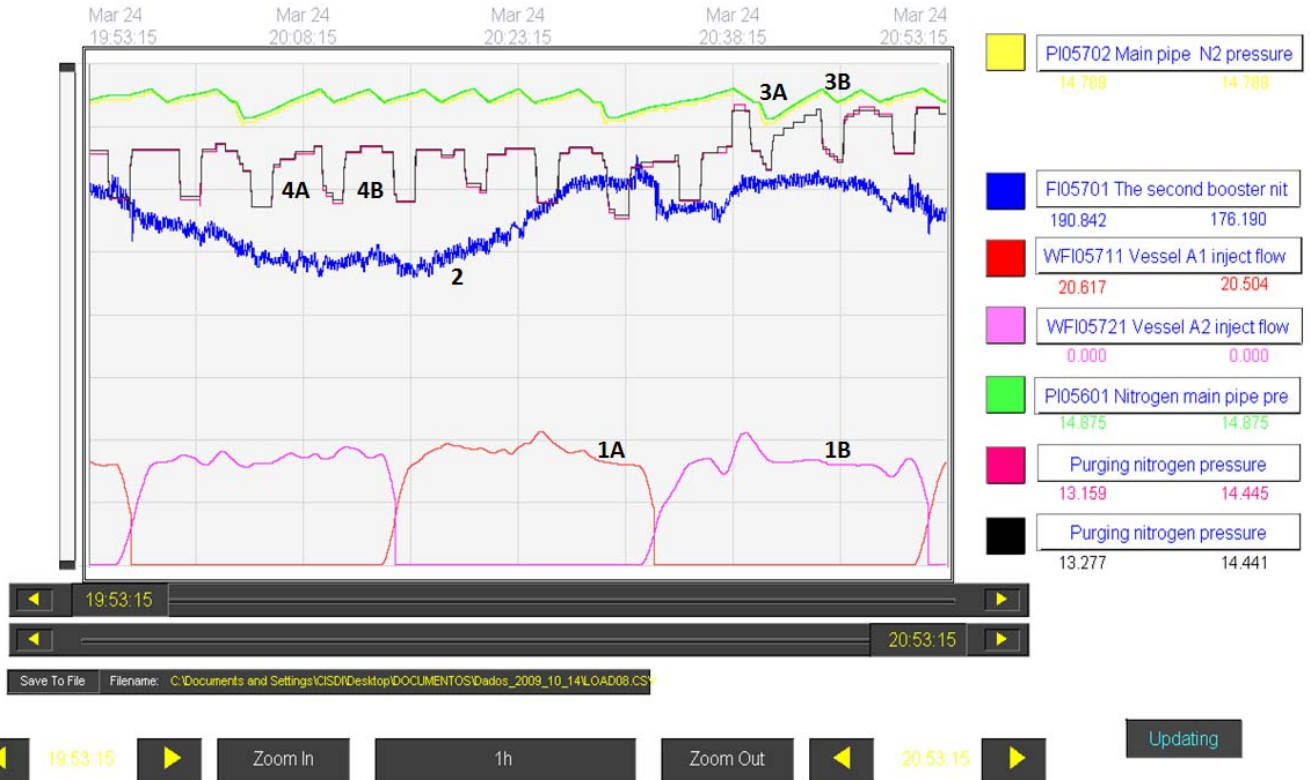
O propósito é verificar primeiramente, por meio da análise dos gráficos as causas que influenciam as variações no AF, por meio do processo de injeção de carvão pulverizado, e investigar a possibilidade de sugerir mudanças no processo que possibilitem minimizá-las.

De acordo com o objetivo proposto de identificar os principais fatores que influenciam nas condições térmicas do alto-forno a partir de variações na injeção de carvão pulverizado, é necessário entender o comportamento do sistema de injeção do alto-forno por meio da análise das Figuras 3 e 4 e da Tabela 1.

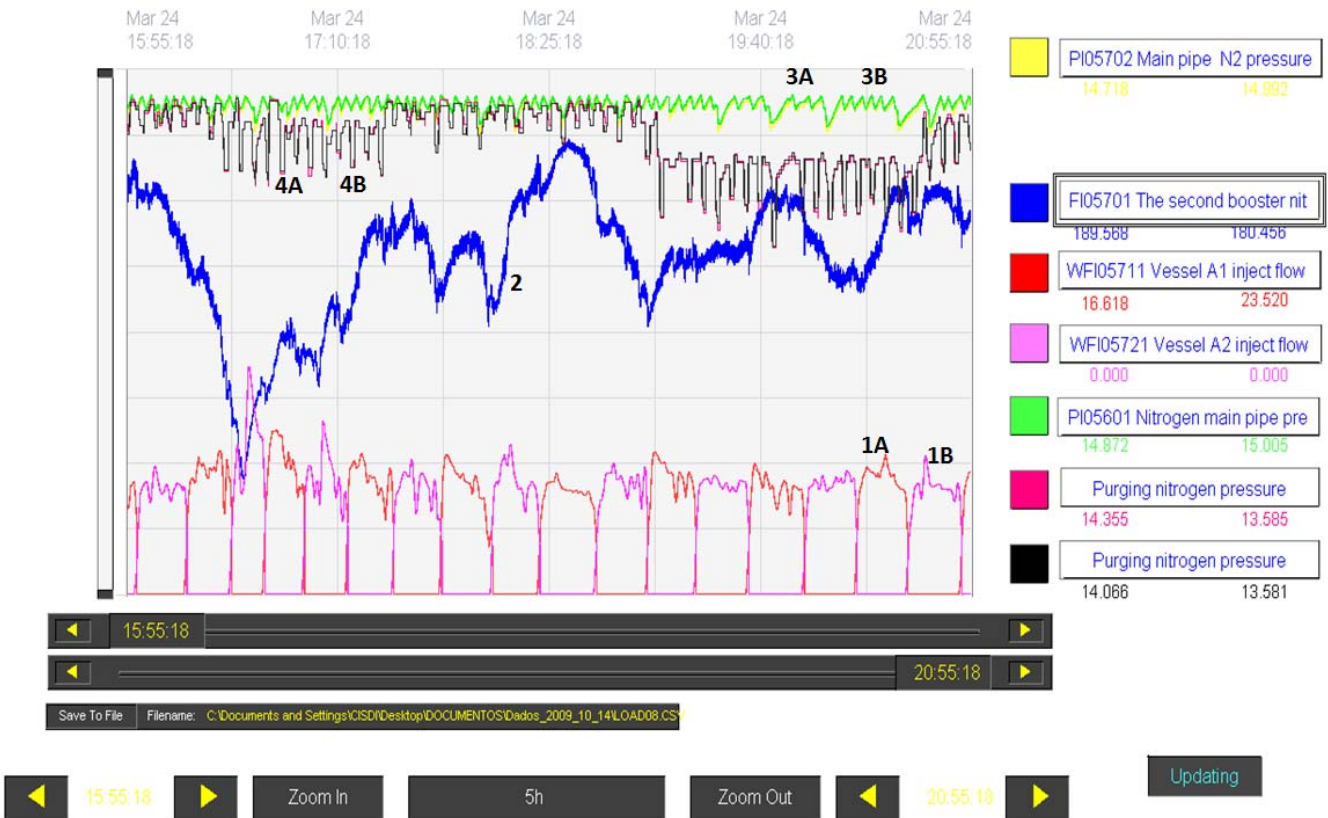
As Figuras 3 e 4 representam os dados de produção de um alto-forno de aproximadamente de referência ( $P= 4$  mil toneladas/dia). Nos gráficos estão descritos os seguintes parâmetros:

- 1) Volume de carvão injetado;
- 2) Vazão de nitrogênio para injeção de carvão;
- 3) Pressão de  $N_2$  da linha de injeção de carvão; e
- 4) Pressão de nitrogênio de limpeza das linhas de injeção.

Baseado nestes dados faz-se uma avaliação das perdas que se obtém durante o período considerado. Medidas devem ser tomadas pelo operador do alto-forno para evitar tais perdas, sob pena de o processo de ICP tornar menos rentável, ou seja reduzir o *pay-back* da unidade e portanto reduzindo também a taxa interna de retorno.



**Figura 3:** Dados de produção para um sistema de injeção de um AF em uma hora.



**Figura 4:** Dados de produção para um sistema de injeção de um AF em cinco horas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 observa-se a relação entre os parâmetros citados e suas respectivas grandezas em função do tempo em horas. Os dados foram coletados do dia 24 de março de 2010 no intervalo de uma hora, iniciando-se às 19h53 e finalizando-se às 20h53. Vale salientar, que as grandezas (do eixo Y) modificam de acordo com a seleção do parâmetro analisado. O objetivo desse gráfico é monitorar o comportamento do sistema em função da taxa de injeção.

Nas linhas 1A e 1B, o parâmetro volume de carvão injetado pelos vasos A e B representa a variação da injeção de carvão no intervalo de uma hora monitorado pelo sistema em função da vazão de ar soprado.

Pode se observar na figura 3 que em intervalos e tempos aproximadamente constantes ocorre a mudança dos vasos de injeção devido a capacidade de armazenamento destes, isto é, para a capacidade máxima de 7 toneladas de um vaso e uma seleção de injeção de carvão de 22 ton/h tem-se aproximadamente 20 minutos de injeção de carvão por vaso. Assim, tem-se o crescimento de uma linha (1A) em decréscimo da outra (1B) justificado pela troca dos vasos de injeção. Outro aspecto observado nesse gráfico é a variação das linhas 1A e 1B quando essas atingem valores mínimos e máximos de injeção em função do valor de referência. Esses valores mínimos e máximos ocorrem devido a fatores relacionados ao sistema de transporte de carvão.

A linha 2 da Figura 3 descreve a vazão de  $N_2$  utilizada para conferir a pressão necessária ao carvão pulverizado para o processo de injeção. O carvão pulverizado utilizado no processo de injeção é transportado dos vasos (A e B) localizados nas plantas de moagem por meio de solução gasosa com o nitrogênio. O nitrogênio é utilizado devido a fatores de segurança uma vez que é um gás inerte e não reage com o carvão transportado. Aqui cabe inclusive uma observação de natureza técnica. O uso de  $N_2$  (um gás inerte) é realmente a forma mais segura de se ter o processo sem qualquer risco de incêndio ou explosão, mas medidas de inflamabilidade do carvão poderiam ou deveriam ser medidas de tal sorte a eventual de uma mistura gasosa de menor custo para o processo.

As linhas 3A e 3B referem-se à pressão de  $N_2$  na tubulação de transporte de carvão pulverizado dos vasos de injeção (A e B) às ventaneiras do alto-forno.

Devido à possibilidade de obstrução das lanças de injeção pela queima precoce do carvão ocasionada por aumento substancial de temperatura na região das ventaneiras, faz-se necessário a limpeza periódica das lanças, a chamada purga. Essa limpeza é realizada por gás nitrogênio a altas pressões. Na Figura 3, a pressão de purga é representada pelas linhas 4A e 4B (referentes aos vasos A e B).

Os parâmetros analisados na Figura 3 referentes às linhas 2, 3A e 3B, 4A e 4B, são fatores que influenciam diretamente na variação do volume de carvão injetado (linhas 1A e 1B) que é a referência de análise desse trabalho.

Os parâmetros apresentados na Figura 4 correspondentes às linhas 1A e 1B, 2, 3A e 3B, 4A e 4B equivalem aos mesmos parâmetros da Figura 1. A diferença entre eles está no período de coleta dos dados, que para a Figura 2 é de 5 horas e para a Figura 1 é de 1 hora. A vantagem de se utilizar a Figura 2 é que ao analisar o comportamento das linhas 1A e 1B em um período de tempo maior, pode-se identificar mais causas que interferem no processo de injeção (representados pelas distorções das linhas 1A e 1B) favorecendo uma análise mais apurada.

Por meio da análise das Figuras 3 e 4 observa-se que as distorções presentes nas linhas 1A e 1B foram originadas por meio de fatores provenientes do sistema de



injeção, os quais incluem os componentes: tubulação de transporte, lanças de injeção, válvulas de controle, granulometria e umidade do carvão, sistema de automação, sensores, manômetros, termopares, dentre outros.

Assim, é possível identificar as possíveis causas que influenciam nas distorções apresentadas nos gráficos, as quais estão enumeradas abaixo:

1. Queda na pressão de N<sub>2</sub> de transporte do carvão
2. Obstrução das lanças e linha de injeção de carvão
3. Variações nas faixas granulométricas do carvão pulverizado
4. Variações nas faixas de umidade do carvão
5. Excesso de curvas na tubulação de transporte de carvão
6. Revestimento da tubulação de carvão inexistente
7. Qualidade química e física do carvão

É importante enfatizar que as variações da injeção de carvão interferem negativamente nas condições térmicas do alto-forno, que influencia na produção de ferro gusa, impactando nos resultados econômicos e financeiros do processo.

A Tabela 1 relaciona as possíveis causas e seus efeitos nas condições térmicas do alto-forno.

**Tabela 1** – Relação causa/efeito nas condições térmicas do alto-forno

Causas	Efeitos
Queda na pressão de N <sub>2</sub> de transporte do carvão	Queda no volume de carvão injetado ocasionando perda térmica
Obstrução das lanças e linha de injeção de carvão	
Variações nas faixas granulométricas do carvão pulverizado	Queda na permeabilidade do cadinho ocasionando perda térmica
Variações nas faixas de umidade do carvão	Queda no volume de carvão injetado ocasionando perda térmica
Excesso de curvas na tubulação de transporte de carvão	
Revestimento da tubulação de carvão inexistente	
Qualidade química do carvão (teor de cinzas)	Menor produção devido ao aumento de escória e diminuição da reatividade do carvão

Donde se deduz que fatores ligados ao projeto do sistema (itens 1, 2 e 6), operacionais (itens 3 e 4), lay-out (item 5) e seleção de carvão são fundamentais para evitar variações nos parâmetros do processo.

Apresentadas as causas e efeitos na Tabela 1, observa-se que é necessário minimizar estas causas para posteriormente eliminar seus efeitos com o intuito de manter as melhores condições térmicas para propiciar maior rendimento do alto-forno. Logo, relacionando as causas encontradas, com o sistema de injeção e as figuras 3 e 4, conclui-se que quanto menor for a variação nas linhas 1A e 1B melhor será o rendimento do alto-forno em termos de produtividade.

Por meio do estudo de caso de uma determinada empresa pode-se determinar exatamente o efeito de cada variável aqui apresentada sobre a economia do processo, de acordo com a expressão:

$$E_T = TIMP * (CMS * TS - CMI) * P \quad (6)$$

Em que:

$E_T$  = Economia no sistema de injeção (R\$/ano)

TIMP = Taxa de injeção de carvão pulverizado (kg/t)

CMS = Custo do coque (= 0,324 R\$/kg)

CMI = Custo do material injetado (= 0,250R\$/kg)

P = Produção de gusa (t/tempo) (1.500.000 t/ano)

TS = Taxa de substituição (adimensional)

Uma avaliação sumária dos fatores indica perdas significativas no resultado da injeção no alto-forno. Tomando por base a equação acima e os dados mostrados anteriormente, mostram-se na Tabela 2 as perdas obtidas devidos aos problemas identificados. É claro que os valores aqui referenciados são apenas citados como exemplos e extrapolados em um ano.

**Tabela 2** – Resultados financeiros de causas de problemas no sistema ICP

<b>Causa</b>	<b>Efeito anual (perda) (R\$/ano)</b>
Projeto do sistema	624.000,00
Problemas operacionais	3.759.300,00
<i>Lay-out</i>	1.721.400,00
Seleção de carvão	5.544.971,00

Portanto, uma análise criteriosa dos fatores que vão afetar a taxa de injeção, a operação do alto-forno, seleção adequada do carvão a ser injetado, o projeto do sistema são fundamentais para se tirar o máximo do sistema disponível de ICP em uma usina siderúrgica. Por outro, pelo estudo de caso em tela, pode-se verificar que a principal causa de maior perda no processo de ICP está relacionada a seleção de carvão pulverizado, seguido por problemas operacionais, lay-out e finalmente o projeto do sistema que não garantem uma resultado 100 % do esperado pela empresa na sua fase de implantação do sistema.

Deve ser comentado que esta análise aqui mostrada é inédita na literatura e visa mostrar a operação dos sistemas operacionais e/ou aquelas unidades que ainda não implantaram o sistema, que existem formas de se ganhar ainda mais pela implantação da ICP em altos-fornos.

## 5 CONCLUSÕES

Baseado na contribuição técnica e os estudos aqui desenvolvidos pode-se concluir:

- é de suma importância verificar o comportamento de gráficos de controle, os quais possibilitaram uma análise mais criteriosa do sistema de injeção,
- a importância da identificação das possíveis causas que influenciam decisivamente nas condições térmicas do alto-forno e no seu desempenho.
- o efeito de problemas operacionais junto a seleção inadequada de carvão mineral implica em perdas de até 80 % na economia do sistema de ICP.
- o lay-out e projeto do sistema são dois itens também importantes que podem causar perdas na economia de 20 % na economia máxima atingível para um sistema de injeção de carvão pulverizado
- portanto medidas no sentido de evitar perdas na queda na pressão de  $N_2$  de transporte do carvão; evitar obstrução das lanças e linha de injeção de carvão; reduzir variações nas faixas granulométricas do carvão pulverizado;



- desenvolver projeto para aprimorar a seleção adequada de carvão mineral, entre outras são bem vindas e deveriam ser motivo de trabalho contínuo por parte das empresas que usam o sistema de ICP.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola de Minas – UFOP, Fundação Gorceix, FAPEMIG e CNPq que tem apoiado as pesquisas do professor.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, Carlos F. C. Caracterização de Carvão Vegetal para a sua injeção em Altos-Fornos a Carvão Vegetal de Pequeno Porte. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Ouro Preto, 2008, 108p.
- 2 ARAUJO, L. A.; Manual de Siderurgia, Produção. São Paulo: Ed. 1997. V. 1, 512p.
- 3 MOURÃO, M. B. et alli. Introdução a Siderurgia. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007, 310p.
- 4 FERNANDES, Mauro Vivaldino. Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (Fuel-Rate). Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFMG, 2007.
- 5 GOMES, Maria L. I. Avaliação da Viabilidade Técnica da Utilização de Mistura de Carvão Faxinal com Importados para Injeção em Altos-Fornos, Dissertação de Mestrado, UFGS, Porto Alegre, 2004.
- 6 ASSIS, P. S. et al. Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, 292p.