



CO-INJEÇÃO DE GÁS NATURAL E CARVÃO EM ALTOS-FORNOS*

*Ulysses Forastieri de Matos¹
João Felipe Araújo Carneiro de Abreu²
Silvio Pessoa Ferraz²
Ramon Moreira Lemos³
Fabiano de Souza Moreira³
Mateus Paresqui Basaro³*

Resumo

A injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras dos altos-fornos vem se mostrando, nas últimas décadas, como uma técnica de redução do consumo de combustíveis e conseqüente redução de custo de produção de gusa. Uma das últimas técnicas de injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras, utilizada por algumas usinas siderúrgicas integradas a coque, no Brasil, nos últimos anos, é a injeção de carvão pulverizado e gás natural simultaneamente, aqui chamada de co-injeção. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos na utilização desta modalidade de injeção em escala industrial.

Palavras-chave: Alto-Forno; Co-injeção; Gás natural; Carvão mineral.

COMBINED INJECTION OF NATURAL GAS AND COAL IN BLAST FURNACE

Abstract

The auxiliary fuel injection by tuyeres has presented, in the last decades, as one technique of fuel reduction and hot metal production cost reduction. One of the ultimate techniques of auxiliary injection by the tuyeres, used in some integrated plants in Brazil, is the injection of coal and natural gas at the same time, so called co-injection. This paper presents the results obtained during the use of these technique in industrial practices.

Keywords: Blast furnace; Simultaneous injection; Natural gas; Coal.

¹ Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Gerência de Altos Fornos; Gerdau Usina Ouro Branco, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Gerência de Manutenção da Redução; Gerdau Usina Ouro Branco, Brasil.

³ Engenheiro Elétrico, Gerência de Manutenção da Redução; Gerdau Usina Ouro Branco, Brasil.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

A partir dos anos 50 muitos altos-fornos ao redor do mundo sofreram um grande número de aportes tecnológicos, no sentido de aumentar a sua eficiência energética e reduzir custos operacionais, reduzindo o consumo de combustíveis e aumentando a produtividade. Uma das inovações mais recentes no tocante ao consumo de combustíveis em algumas usinas siderúrgicas no Brasil foi a injeção combinada de carvão mineral pulverizado não coqueificável (PCI) e gás natural simultaneamente pelas ventaneiras, também conhecida como co-injeção de gás e carvão. Os benefícios obtidos com o uso desta técnica são redução no consumo de coque metalúrgico e também de carvão, aumento da produtividade, elevação do poder calorífico do gás de topo, melhora da qualidade do gusa, redução do fuel rate e redução de emissões de CO₂ e SO₂ para atmosfera. Podem ser citados ainda efeitos não mensuráveis obtidos na co-injeção como maior estabilidade de marcha, redução de resíduos de combustão e uso de matérias-primas de pior qualidade. O presente trabalho apresenta os resultados desta técnica obtidos em escala industrial em altos-fornos de médio e grande porte.

2 DESENVOLVIMENTO

Para avaliar os resultados obtidos com a co-injeção, os resultados foram comparados entre um período utilizando apenas carvão mineral como combustível auxiliar com outro período utilizando injeção simultânea de gás natural e carvão mineral. Durante o período de injeção simultânea, o gás natural substituiu parte do carvão mineral e também parte do coque carregado pelo topo.

2.1 Descrição dos Equipamentos

Na tabela abaixo estão descritos os dados dos altos-fornos estudados no presente trabalho. O alto-forno de maior porte é aqui chamado de alto-forno A e o alto-forno de menor porte é chamado de alto-forno B.

Tabela 1. Dados dos altos-fornos

| | Alto forno A | Alto forno B |
|--|--------------|--------------|
| Volume interno (m ³) | 3.080 | 1.750 |
| Produção diária (t/dia) | 7.300 | 4.500 |
| Número de ventaneiras | 28 | 24 |
| Pressão de sopro (kg/cm ²) | 3,60 | 3,20 |
| Diâmetro de cadinho (m) | 11,50 | 9,40 |
| Refrigeração | staves | staves |
| Número de furos de gusa | 4 | 2 |

2.1.1 Gás natural

O gás natural é produzido, muitas vezes juntamente com o petróleo, através da extração nas bacias sedimentares da crosta terrestre. Ao chegar à superfície ele é tratado para remoção de impurezas, como água e outros gases. A seguir ele é transportado por gasodutos para as zonas de consumo e refino. O Gás Natural é definido como uma mistura de hidrocarbonetos (contém somente hidrogênio e carbono) parafínicos leves, contendo predominantemente metano, etano, propano, butano e outros componentes de maior peso molecular, que à temperatura ambiente e pressão atmosférica permanece no estado gasoso [1]. Apresenta normalmente baixos teores de contaminantes tais como nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos sulfurados, com raras ocorrências de gases nobres (hélio e argônio). Sua composição é caracterizada pela mistura de hidrocarbonetos leves, produz

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



uma combustão limpa que emite menor quantidade de dióxido de carbono na atmosfera [2]. A densidade do gás tratado neste trabalho é a densidade relativa típica de 0,794 kg/m³. A composição do gás natural utilizada neste trabalho é formada, em sua maioria, por metano (CH₄) e porções menores de etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀). A tabela 2 apresenta a composição do gás natural utilizado neste estudo.

Tabela 2. Composição do gás natural

| Componente | Faixa de trabalho, % | Valor típico, % |
|----------------------------------|----------------------|-----------------|
| CH ₄ | > 85 | 93 |
| C ₂ H ₆ | < 12 | 4 |
| C ₃ H ₈ | < 6 | 1 |
| C ₄ H ₁₀ | < 3 | 0,50 |
| CO ₂ + N ₂ | < 6 | 1,50 |

2.1.2 Carvão mineral

Para se compreender as propriedades dos carvões, quer as que se observa na sua aplicação em diferentes tecnologias, quer aquelas mensuráveis em testes e ensaios normalizados, se faz necessário conhecer a maneira pela qual os carvões foram formados [3]. O carvão não é uma substância homogênea, pois é formado de vários constituintes chamados macerais, os quais variam muito na sua composição química e propriedades físicas. Além da matéria orgânica, o carvão também é constituído por matéria mineral, que pode estar associada de diferentes maneiras e em vários teores à matéria carbonosa. A estrutura heterogênea do carvão é perceptível a olho nu, mas somente o microscópio revela os detalhes dos constituintes do carvão, descritos tanto pela sua forma quanto pela origem. Logo que as partículas são injetadas no forno, elas são aquecidas pela radiação da chama da corrente de ar. Então a matéria volátil é liberada, e a ignição inicia na partícula ou na fase gasosa. As reações químicas iniciais são exotérmicas e produzem CO₂ e H₂. Vapor d'água e CO₂ reagem então com o C para formar H₂ e CO [4]. A figura 1 apresenta a distribuição de temperatura e gases desde a ventaneira até o raceway [5].

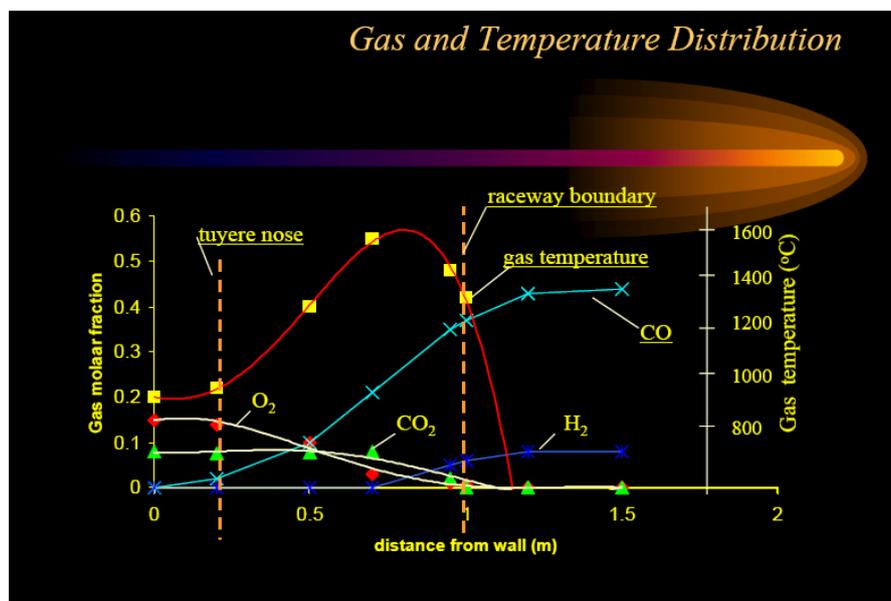


Figura 1: Distribuição de temperatura e gases no raceway [5].

2.2 Características da Co-injeção de Carvão Mineral e Gás Natural

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A principal alteração observada a partir da utilização do gás natural substituindo parte do carvão mineral e do coque é a elevação no teor de H₂ no gás formado no raceway. Este gás é responsável por todo o ganho obtido na co-injeção. A difusividade do H₂ é maior do que a do CO na partícula mineral, o que provoca o ganho na redutibilidade da partícula mineral, assim como a elevação do poder calorífico do gás de topo devido à contribuição do H₂. A tabela 3 apresenta a difusividade do hidrogênio em relação aos demais gases envolvidos na redução [5].

Tabela 3. Difusividades dos reagentes e produtos da combustão no raceway [5]

| Difusividades (cm ² /s a 1100°C) | H ₂ | CO | H ₂ O | CO ₂ |
|--|----------------|-----|------------------|-----------------|
| | 10,5 | 3,0 | 4,4 | 2,8 |

A injeção de gás natural provoca maior redução da temperatura de chama do que o carvão, o que pode ser explicado devido à energia necessária para quebra de um maior número de ligações C – H do gás, comparativamente ao carvão, o que demanda maior aporte térmico que pode ser proporcionado principalmente pelo enriquecimento de oxigênio do ar de sopro ou alternativamente por elevação da temperatura de sopro ou redução da injeção de vapor.

3 RESULTADOS

O período de avaliação dos resultados compreende os meses de julho de 2013 a março de 2014. Os resultados obtidos apresentam redução do fuel rate, coque rate e carvão rate, elevação do poder calorífico no gás de topo, aumento da produtividade e melhora da qualidade do gusa. A taxa máxima média de gás natural injetado atingida foi de 33 kgGN/tgusa e a mínima de carvão e coque foram 81 kgPCI/tgusa e 366 kgcoque/tgusa, respectivamente. No alto-forno A esta taxa atingiu valores de vazão de GN de 14.000 Nm³/h e no alto-forno B de 9.500 Nm³/h. A redução no fuel rate com a co-injeção chegou a 10 kg/t nos dois fornos estudados.

3.1 Co-injeção no Alto-Forno A

A figura 2 apresenta o resultado de consumo do coque rate do alto-forno A.

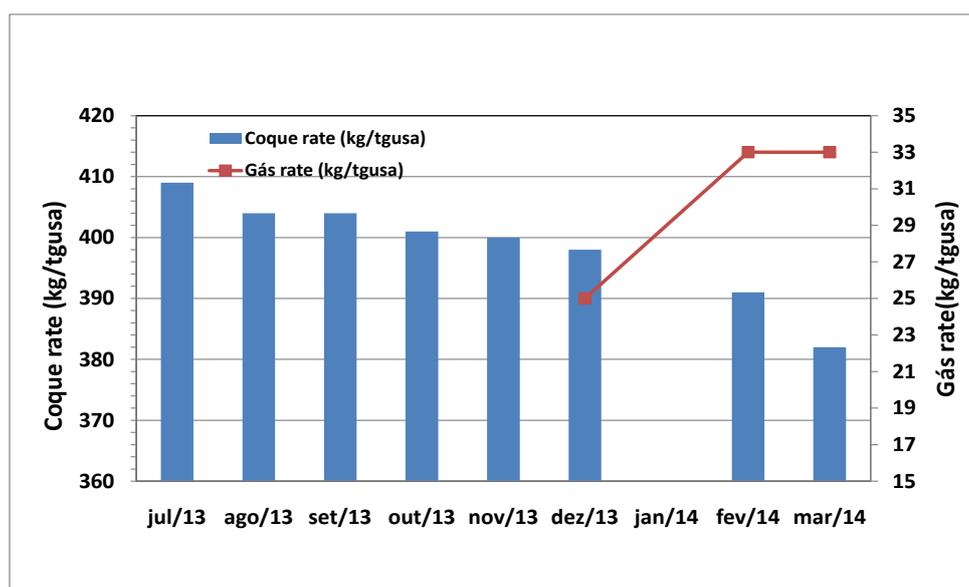


Figura 2 : Consumo mensal de coque no alto-forno A

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A redução de consumo no coque com a injeção combinada chegou a 19 kgcoque/tgusa. O resultado do mês de janeiro de 2014 foi desconsiderado nesta análise devido à elevação do fuel rate em função de problemas operacionais. A figura 3 apresenta o resultado de redução do fuel rate do alto-forno A após o início da injeção combinada de gás e carvão. O resultado do mês de janeiro de 2014 foi desconsiderado nesta análise devido à elevação do fuel rate em função de problemas operacionais. A redução do fuel rate neste caso chegou a 10 kg/tgusa.

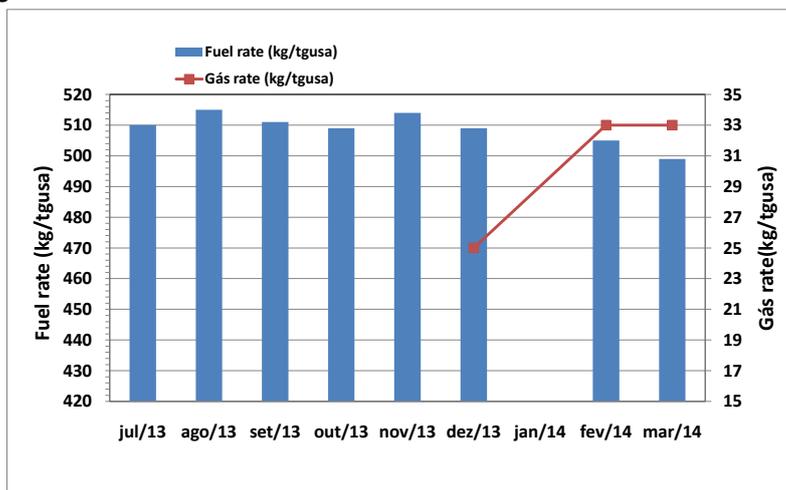


Figure 3 : Fuel rate do Alto-forno A

A figura 4 apresenta o resultado de redução do carvão rate do alto-forno A após o início da injeção combinada de gás e carvão. O resultado do mês de janeiro de 2014 foi desconsiderado nesta análise devido à elevação do fuel rate em função de problemas operacionais. A redução do carvão rate neste caso chegou a 27 kg/tgusa.

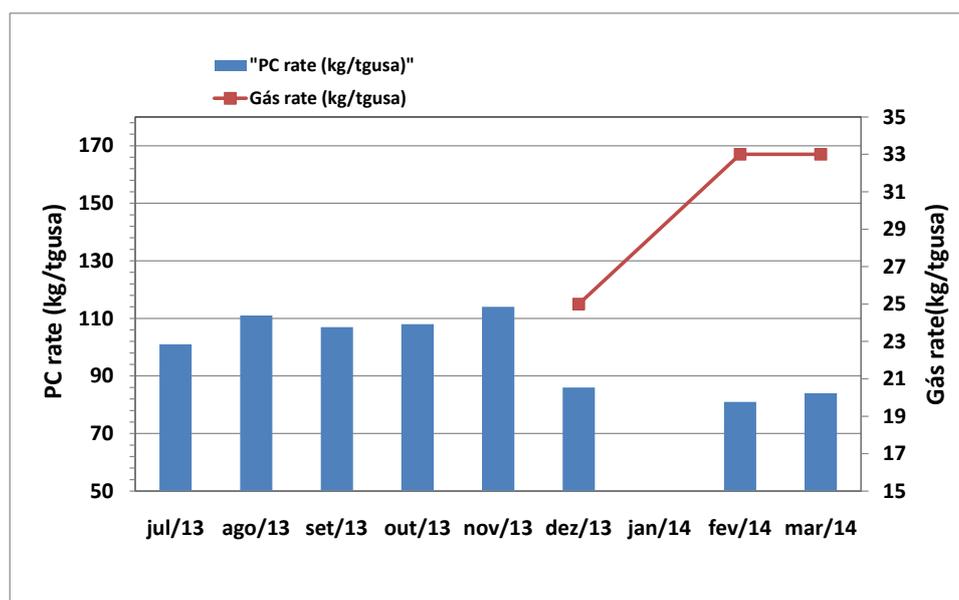


Figure 4 : PC rate do Alto-forno A

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



3.2 Co-injeção no Alto-Forno B

A figura 5 apresenta o resultado de consumo do coque rate do alto-forno B. A redução de consumo no coque com a injeção combinada chegou a 21 kgcoque/tgusa. Os resultados de dezembro de 2013, janeiro e fevereiro de 2014 foram desconsiderados devido à ocorrências operacionais.

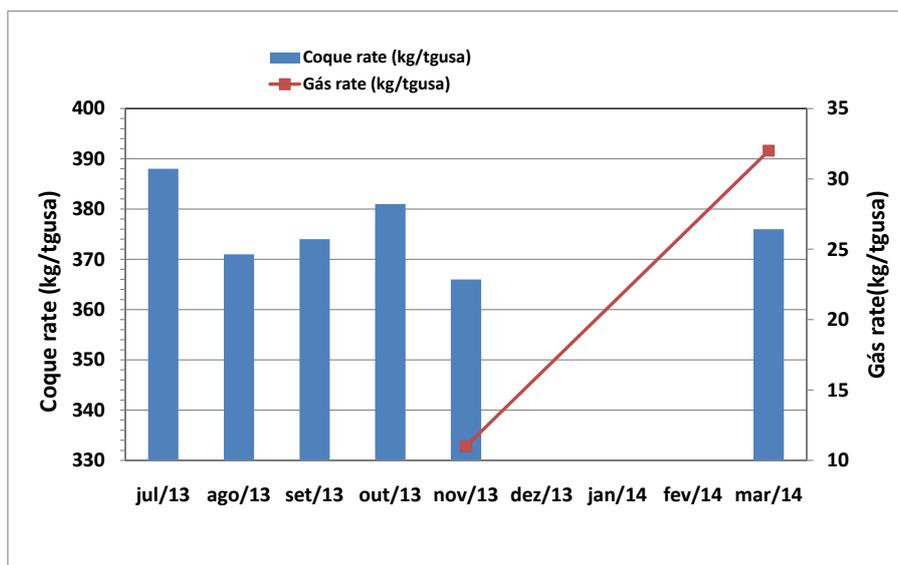


Figura 5. Coque rate do Alto-forno B

O resultado de fuel rate no alto-forno B neste período sofreu elevação em relação aos valores típicos no período de injeção de gás natural entre novembro e fevereiro devido à irregularidades operacionais e por isso não é analisado. A Figura 6 mostra o resultado da redução no carvão rate no alto-forno B.

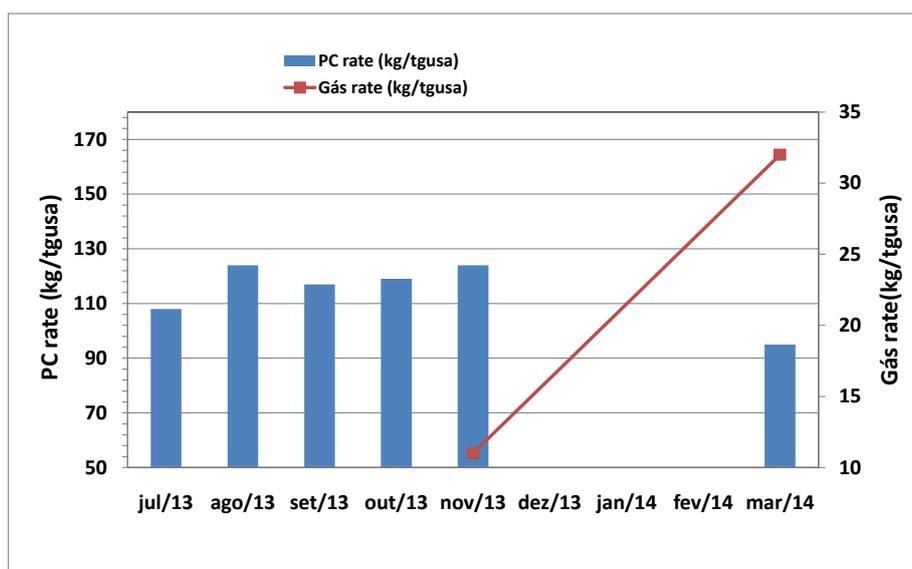


Figura 6: Carvão rate do Alto-forno B

3.3 Resultados nos Parâmetros de Processo

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



O teor de H₂ no gás de topo subiu de 2,7% para 5,9% em média para o alto-forno A e de 2,9% para 6,0% para o alto-forno B, e por conseqüência, o poder calorífico do gás de topo sofreu elevação média de 30 kcal/Nm³ nos dois altos-fornos. A elevação média na produtividade foi de 0,15 t/d/m³ no alto-forno A e 0,23 t/d/m³ no alto-forno B no período estudado. O enxofre sofreu uma redução média de 0,009% nos dois altos-fornos. A temperatura de chama, após elevação de 2,3% em média no enriquecimento de oxigênio, se manteve na faixa de trabalho em torno de 2250°C.

4 DISCUSSÃO

A utilização do gás natural como combustível auxiliar simultaneamente ao gás natural se apresentou como uma alternativa técnica e economicamente viável mais uma vez em escala industrial trazendo redução de consumo de coque e também como redução do consumo de carvão mineral. A taxa de substituição média obtida durante o período de injeção foi de 1,5 kgcarvão/kgGN e 1,35 kgcoque/kgGN nos dois altos-fornos conforme esperado. Para manter a temperatura de chama na faixa de trabalho foi necessário elevar o oxigênio de enriquecimento do sopro em até 2,7% em alguns momentos. O uso da injeção combinada depende fundamentalmente do preço do gás natural no mercado quando comparado ao preço do carvão mineral e a quantidade substituída depende da quantidade injetada de ambos os combustíveis. Sabe-se que quanto maior a quantidade de injetante, maior a concorrência por oxigênio nas ventaneiras e menor quantidade de carvão ou coque pode ser substituído por gás natural, ou seja, a taxa de substituição do gás e do carvão tendem a cair. A redução do fuel rate observada nos dois casos se deve à maior quantidade de H₂ gerado no gás de ventaneira cuja difusividade é maior que o CO o que melhora a redução dos óxidos de ferro na cuba e reduz a ocorrência de redução direta, que consome mais combustível nas regiões inferiores do forno.

5 CONCLUSÕES

O uso da injeção de carvão e gás natural simultaneamente apresentou uma redução significativa no consumo de combustíveis tanto no alto-forno de grande como de pequeno porte. Houve ainda elevação do %H₂ no gás de topo, o que elevou o poder calorífico nos dois altos-fornos estudados. O teor de enxofre do gusa também sofreu alteração devido ao menor enxofre incorporado ao processo via coque e carvão mineral conforme previsto. Para manter a temperatura de chama dentro da faixa de trabalho foi necessário elevar o % de oxigênio de enriquecimento reduzindo o volume de sopro de forma a manter o mesmo nível de produção.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Gerdau por permitir aos seus colaboradores a oportunidade de desenvolvimento profissional através da troca de informações e discussões técnicas buscando aprimoramento do processo de injeção de gás natural e carvão pulverizado através de benchmarking externo.

REFERÊNCIAS

- 1 GasNet. GasNet o site do gás natural [acesso em 20 mai. 2014]. Disponível em: www.gasnet.com.br.
- 2 Goiasgas. [acesso em 20 mai. 2014]. Disponível em: www.goiasgas.com.br.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

Redução de Minério de Ferro & Tecnologia Mineral

Ironmaking and Mineral Technology

44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas

15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro

2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro

44th Ironmaking and Raw Materials Seminar

15th Brazilian Symposium on Iron Ore

2th Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore

Topic Center: Desafios para a mineração e siderurgia frente à nova realidade dos recursos de minério de ferro e carvão

Main Theme: Challenges for mining and steel making facing the current and future quality of the reserves of iron-ore and coal



- 3 Assis PS. Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos [Curso]. Belo Horizonte; 1993.
- 4 Gomes MLI. Avaliação da viabilidade técnica da utilização de misturas do carvão faxinal com importados para injeção em altos-fornos [dissertação de mestrado]. Porto Alegre; 2004.
- 5 Lingiardi OE. Tecnologia de injeção de gás natural em alto-forno [Curso ABM]. Vitória; 2011.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*