

CO-INJEÇÃO DE GÁS NATURAL, MOINHA DE CARVÃO VEGETAL E CARVÃO MINERAL NO ALTO-FORNO “A” DA ARCELORMITTAL MONLEVADE¹

Maurício Bittencourt Marques²
Adílson Rodrigues Assis²
Seleme Marlon Benício Dias²
Fabiano Harley Araújo²
Fabiano Cristeli de Andrade²
Rodrigo Junqueira dos Santos²

Resumo

A gestão do uso de combustíveis/redutores na produção de gusa em altos-fornos é um dos maiores desafios para uma operação com baixo custo, segurança operacional, estabilidade produtiva e obtenção de um produto na qualidade requerida. Em 2008 após estudos e testes, a utilização de moinha de carvão vegetal proveniente do peneiramento na ArcelorMittal Juiz de Fora se mostrou viável em Monlevade perdurando até os dias atuais. A co-injeção de gás natural, moinha de carvão vegetal e carvão mineral no Alto-Forno “A” teve início em janeiro de 2011 com a entrada em operação da instalação de injeção de gás natural. Os resultados obtidos foram acima do esperado conseguindo atingir uma taxa de injeção de gás natural média de até 48 kg/t, taxa de injeção total de 165 kg/t com redução expressiva no *coke rate*. Ganhos secundários foram obtidos com a elevação do PCI do gás de alto-forno, redução do consumo de vapor no controle de temperatura de chama e principalmente na possibilidade de elevação da participação da moinha no mix de pulverizados injetado. Além disso, o uso de gás natural gerou uma redução importante da emissão de CO₂ na produção de gusa.

Palavras-chave: Alto-forno; Co-injeção; Gás natural; Moinha.

CO-INJECTION OF NATURAL GAS, CHARCOAL FINES AND PULVERIZED COAL IN THE ARCELORMITTAL MONLEVADE BLAST FURNACE “A”

Abstract

The selection of fuel used in blast furnace hot metal production is a major challenge to achieve low cost operation, production stability, operational safety and to reach the required quality. In 2008 after studies and tests, charcoal fines from the screening at ArcelorMittal Juiz de For a Plant, started to be injected in Monlevade Blast Furnace “A”. The co-injection of natural gas, charcoal fines and pulverized coal in Blast Furnace “A” started in January 2011 with the start up of the natural gas injection installation. The results were above the expected with natural gas injection achieving up to 48 kg / t, and total injection rate of 165 kg / t, with significant reduction in coke rate. Secondary gains were verified by raising the LCV of blast furnace gas, reducing steam consumption in the control of flame temperature and, especially, the possibility of increasing the charcoal fines rate. Furthermore, the use of natural gas has generated a substantial reduction in CO₂ emissions in ArcelorMittal Monlevade hot metal production.

Key words: Blast furnace; Co-injection; Natural gas; Charcoal fines.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Funcionários da Gerência de Redução da ArcelorMittal Monlevade.

1 INTRODUÇÃO

A gestão do uso de combustíveis/redutores na produção de gusa em altos-fornos é um dos maiores desafios para uma operação com baixo custo, segurança operacional, estabilidade produtiva e obtenção de um produto na qualidade requerida.

O Alto-Forno “A” (AF-A) da ArcelorMittal Monlevade entrou em operação em dezembro de 1999 e, desde então, sua operação apresenta uma contínua evolução na utilização de combustíveis/redutores. O projeto inicial previa uma operação com coque importado e 160 kg/t de injeção de finos de carvão mineral utilizando-se lança única. Sistema de injeção com lança dupla, utilização de coque próprio (Coque SOL), enformamento de antracito granulado e elevação gradual na participação de *small coque* são alguns exemplos desta evolução.^(1,2) Em 2008 iniciou-se a injeção de moinha de carvão vegetal em conjunto com o carvão mineral e em 2011 o gás natural começou a ser utilizado como combustível de injeção.

A injeção de moinha iniciou-se após o início de operação de dois altos-fornos a carvão vegetal na ArcelorMittal Juiz de Fora em 2007, que possui uma geração excedente de moinha de carvão vegetal. Após estudos e testes, a utilização deste combustível se mostrou viável em Monlevade perdurando até os dias atuais.

O início de operação do Gasoduto Vale do Aço em 2010, propiciou às empresas da região a oportunidade de utilização deste combustível em suas operações. Em outubro deste mesmo ano, a ArcelorMittal Monlevade iniciou seus estudos sobre a sua utilização no processo de produção de gusa e, em janeiro de 2011, começou a co-injeção de gás natural, moinha de carvão vegetal e carvão mineral no AF-A.

O presente texto visa descrever a instalação de injeção de gás natural do AF-A, e os resultados de operação com a co-injeção de gás natural, moinha de carvão vegetal e carvão mineral.

2 A UTILIZAÇÃO DE MOINHA DE CARVÃO VEGETAL

A injeção de moinha de carvão vegetal em substituição ao combustível fóssil (carvão mineral) apresenta várias vantagens tanto dos pontos de vista econômico e ambiental, quanto do ponto de vista de processo.

Os últimos anos foram marcados por elevação dos preços das *commodities* no mercado mundial. O carvão mineral metalúrgico vem apresentando alta volatilidade e forte tendência de elevação de preços gerando grande impacto nos custos de produção do gusa e do aço. Neste cenário, a utilização de um material gerado internamente no grupo, como é o caso da moinha, com uma valorização descolada do mercado global é muito interessante.

Observando do ponto de vista ambiental, o balanço do uso de carvão vegetal para produção de gusa levando-se em consideração todo o ciclo de produção, apresenta efeito positivo na remoção de CO₂ e emissão de O₂ para a atmosfera.

É possível perceber que a moinha apresenta contribuições importantes para o processo do alto-forno. As cinzas da moinha de carvão vegetal são prioritariamente constituídas de CaO.⁽³⁾ Este fato tem impacto importante e positivo na temperatura de fusão das cinzas presentes no mix de carvão assim como na viscosidade desta escória formada na região do *raceway*.⁽⁴⁾ Outro aspecto positivo é o fato da moinha apresentar uma combustibilidade maior quando comparada com os carvões minerais de injeção.⁽⁵⁾ Isto ocorre, principalmente, devido à morfologia das suas partículas que apresentam uma maior quantidade de poros em relação aos carvões minerais

comumente injetados. Por outro lado, a análise elementar do material revela um teor mais baixo de carbono o que tem impacto sobre a taxa de substituição da moinha quando comparada ao coque, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Outro importante fator a ser observado com a utilização de moinha na injeção é que a sua baixa densidade leva a um problema de classificação e manuseio do material. A utilização de 10% de moinha no *mix* de injeção eleva em 7% o volume de material.⁽²⁾ Variações na dosagem podem, em alguns momentos, levar a uma transferência volumétrica maior do que a capacidade de extração da rosca sem fim, levando a um enchimento do filtro e parada da planta devido à alta diferença de pressão no filtro. Este é o principal fator limitador do uso de moinha em Monlevade.

3 A INJEÇÃO DE GÁS NATURAL EM ALTOS-FORNOS

3.1 Introdução

Desde 1958, quando foi pela primeira vez injetado em um alto-forno na Zaporozhstal, antiga União Soviética, o gás natural vem sendo utilizado como agente redutor e combustível em altos-fornos em diversas usinas siderúrgicas ao redor do mundo. O seu uso está intimamente ligado a redução do consumo de coque na produção de gusa, contudo a injeção de gás natural também altera de diferentes formas a operação de um alto-forno.

3.2 O Gás Natural

O gás natural é um combustível fóssil composto por hidrocarbonetos encontrado na natureza normalmente associado ao petróleo. Sua composição química pode apresentar variação de região para região. O gás fornecido pela GASMIG para a região do Vale do Aço apresenta as propriedades indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do gás natural utilizado em Monlevade

Espécie química	Especificação, %	Típico, %
CH ₄	> 85,0	95,2
C ₂ H ₆	< 12,0	2,6
C ₃ H ₈	< 6,0	0,5
C ₄ H ₁₀ e C ₅ H ₁₂	< 3,0	0,2
CO ₂ + N ₂	< 6,0	1,5
N ₂	< 2,0	0,8
Densidade, kg/Nm ³		0,715
PCS, kcal/m ³ *		9.000
PCI, kcal/m ³ *		8.100

* O fornecimento do gás é contabilizado em m³ sendo utilizado como padrão a temperatura de 20°C e a pressão de 1 atm.

Pela composição química podemos perceber uma grande diferença do gás natural em relação aos outros combustíveis utilizados em altos-fornos. A Tabela 2 mostra a diferença da análise elementar do gás natural comparado ao coque, ao carvão mineral e à moinha de carvão vegetal.

Tabela 2. Análise elementar dos principais combustíveis utilizados no AF-A

Análise elementar, %	Coque	Carvão mineral	Moinha de carvão vegetal	Gás natural
C	86,8	82,3	63,6	73,5
H	0,9	3,9	6,3	23,9
O	0,3	3,2	13,5	1,3
N	0,3	1,5	2,6	1,3
S	0,7	0,4	0,02	0,0

3.3 Impacto em Temperatura de Chama

Na zona de combustão de um alto-forno se processam dois tipos principais de reação. As reações de oxidação ocorrem no sentido de formação dos gases CO/CO₂ e H₂O a partir do carbono e do hidrogênio presente nos combustíveis usando como comburente o O₂ do ar soprado. Como o alto-forno é um reator com ambiente altamente redutor, logo que se formam os gases CO₂ e H₂O, estes são reduzidos à forma de CO e H₂ respectivamente (Figura 1).

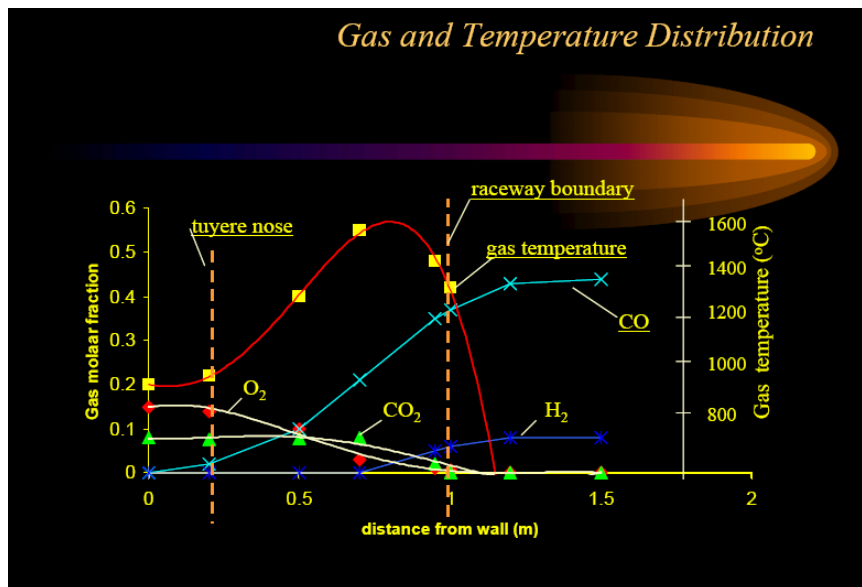


Figura 1. Temperatura e composição química do gás na zona de combustão.⁽⁶⁾

A reação de redução do H₂O é bastante endotérmica.⁽⁷⁾ Desta forma, ao se substituir o carbono do coque pelo CH₄ a temperatura de chama reduzirá. Esta redução calculada é de 4,5°C por kg/t.

Este fato apresenta impacto importante na operação. A temperatura de chama mais baixa significa um aporte menor de energia na zona inferior do alto-forno (zona de elaboração). Seu impacto poderá ser sentido nas temperaturas de gusa escória assim como no teor de Si do gusa e no teor de FeO da escória. A redução de temperatura afeta o equilíbrio Si-SiO₂ no sentido de diminuir a redução da sílica assim como no caso do equilíbrio Fe-FeO.⁽⁸⁾

Outro ponto importante é que a temperatura de chama tem impactos no consumo total de combustível por tonelada de gusa produzido (*fuel rate*) e na combustibilidade dos combustíveis injetados na zona de combustão. Uma operação com injeção de gás natural com temperatura de chama baixa pode acarretar em elevação do *fuel rate* reduzindo dessa forma a taxa de substituição de coque.

3.4 O Papel do H₂ no Alto-Forno

A principal função que o H₂ exerce em um alto-forno é a redução do óxido de ferro. A substituição do monóxido de carbono, formado a partir do carbono do coque, do carvão mineral ou da moinha, pelo H₂ como agente redutor apresenta vários aspectos interessantes. A cinética da reação de redução do óxido de ferro é afetada favoravelmente. As reações de redução são governadas principalmente pela difusividade dos reagentes e dos produtos. A difusividade dos gases envolvidos nas reações de redução em altos-fornos é mostrada na Tabela 3.

Tabela 1: Difusividade de reagentes e produtos da reação de redução dos óxidos de ferro

	Difusividade (cm ² /s)	
	Reagentes	Produtos
H ₂ – H ₂ O	10,5	4,4
CO – CO ₂	3,0	2,8

Percebe-se que tanto o hidrogênio quanto o H₂O apresentam difusividades mais elevadas. Este fato irá contribuir para uma elevação das reações de redução indireta reduzindo o consumo de combustíveis.

A elevação da concentração de hidrogênio no gás produzido na parte inferior do alto-forno altera também a fluido-dinâmica do reator. A perda de carga em um reator contracorrente gás/sólido que opera em regime turbulento, como um alto-forno, pode ser representada pela equação semi-empírica de Ergun.⁽⁹⁾

$$\frac{\Delta p}{h} = 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot (v)^2}{D_p} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

Onde:

- Δp é a perda de pressão entre dois pontos;
- v é a velocidade do gás;
- h é a altura que separa os dois pontos;
- D_p é diâmetro das partículas;
- ε é porosidade ou fração de vazios do leito; e
- ρ é a densidade do gás.

A elevação da concentração de hidrogênio reduz a densidade do gás de rampa. A cada elevação de 1% na concentração de hidrogênio, a densidade do gás reduz 0,9%. Com isso, o alto-forno tende a apresentar uma permeabilidade melhor à passagem de gases e menor a tendência de engaiolamentos.

4 O PROJETO E A INSTALAÇÃO DA INJEÇÃO DE GÁS NATURAL NO ALTO-FORNO “A”

O projeto de injeção de gás natural no AF-A iniciou-se em outubro de 2010 e o *start up* do sistema se deu no dia 07 de janeiro de 2011. O sistema foi desenvolvido internamente contando com a colaboração de diversas áreas da usina de Monlevade, destacando-se às áreas de Engenharia, Meio Ambiente e Utilidades, além da área de Redução. O fluxograma geral do processo é apresentado na Figura 2.

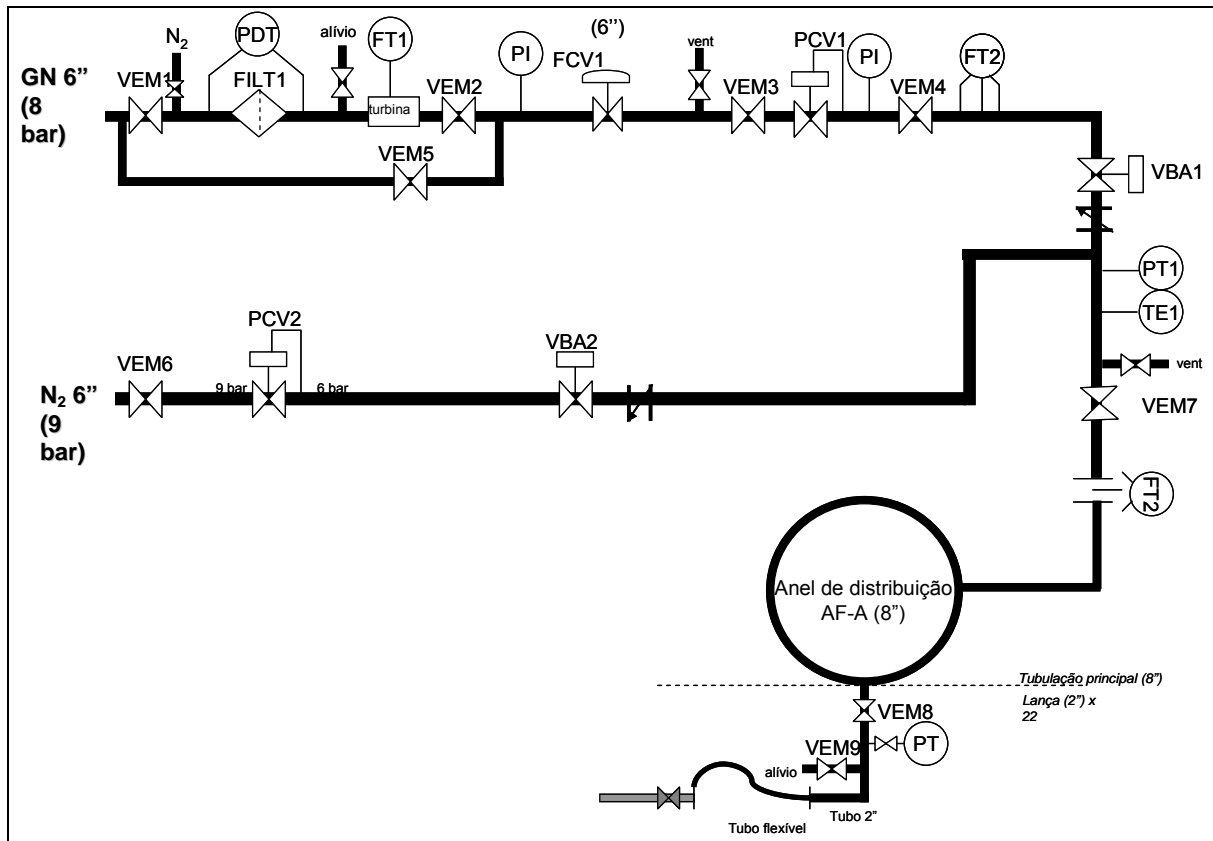


Figura 2. P&I da instalação de injeção de gás natural do AF-A.

A instalação é constituída basicamente por um cavalete interligado a rede de gás natural da Usina e por um conjunto de válvulas para controle de vazão e regulagem de pressão das linhas de injeção além de um transmissor de vazão tipo placa de orifício (normalmente utilizado para controle).

Os principais equipamentos presentes no cavalete são:

- filtro: responsável por impedir a passagem de contaminantes evitando o comprometimento dos equipamentos à frente na linha (válvulas e medidores) e entupimento das lanças. A saturação do filtro é acompanhada através de um transmissor diferencial de pressão;
- medidor de vazão tipo turbina: este é o medidor oficial de vazão utilizado para faturamento do gás junto à Gasmig; e
- válvula reguladora de pressão: responsável pelo controle da pressão na linha que irá para o alto-forno.

Após o cavalete, uma válvula de controle é responsável por controlar a vazão a ser injetada no Alto-Forno, conforme o *set-point* determinado pelo operador. Uma válvula *shut-off* é responsável por isolar o fluxo de gás. A refrigeração e inertização das lanças é realizada com nitrogênio através de uma válvula *shut-off*. O gás está disponível em um anel ao redor do Alto-Forno em 22 linhas ramificadas de forma a buscar manter uma pressão e, conseqüentemente vazão, constante em todas as lanças. Cada linha de injeção possui um transmissor de pressão para detectar entupimento ou vazamento. Em caso de defeito, a injeção em todas as lanças de injeção de gás, será desabilitada automaticamente e a válvula de nitrogênio irá abrir para garantir a refrigeração das lanças e inertização do sistema.

O sistema opera em modo automático, via supervisor, com controle da taxa de injeção, intertravamentos de segurança, supervisão do processo e instrumentos, geração de alarmes e acompanhamento e registro de dados.

A lança utilizada para a injeção em Monlevade tem o mesmo desenho daquela utilizada para injeção de carvão pulverizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução do consumo de combustíveis do Alto-Forno “A” é mostrada na Figura 3. A Figura 4 mostra a utilização percentual dos combustíveis.

É possível perceber a redução na participação de carvão mineral desde o início do uso do carvão vegetal, em 2008.

O início da injeção de gás natural em janeiro de 2011 causou a redução da participação do coque que antes girava em torno de 68% para valores próximos a 65%. O valor médio de *coke rate* no período de injeção de gás natural é 3 kg/t mais baixo do que o melhor resultado anual, que foi obtido em um período de volume de escória mais baixo. Outro ponto importante a ser observado após o início da injeção de gás foi a elevação da participação da moinha no *mix*. Isto foi possível uma vez que a taxa de injeção de pulverizados foi reduzida a partir da elevação da taxa de injeção de gás natural. Desta forma, a instalação de moagem pode absorver um *mix* com densidade inferior sem causar limitação da taxa de injeção. O maior reflexo disso foi sentido no consumo de carvão mineral que caiu de patamares próximos a 25% do *mix* para algo em torno de 17%.

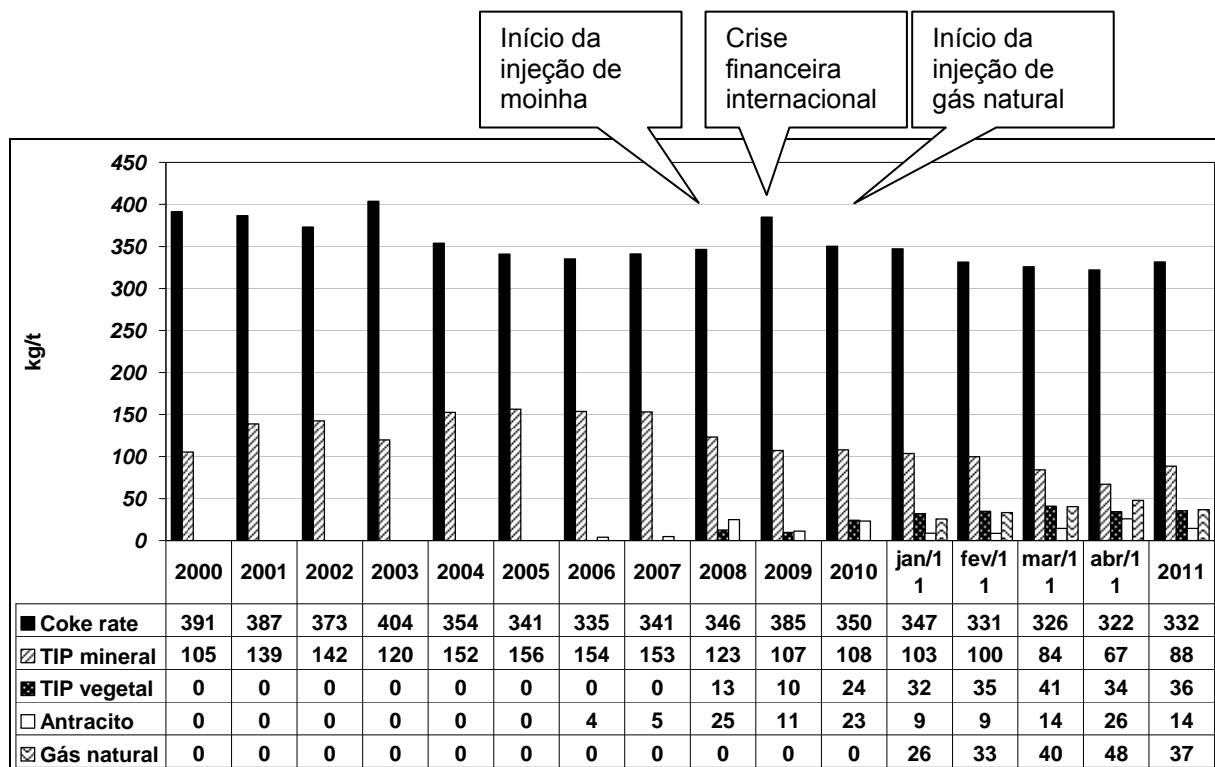


Figura 3. Evolução do consumo de combustíveis no AF-A.

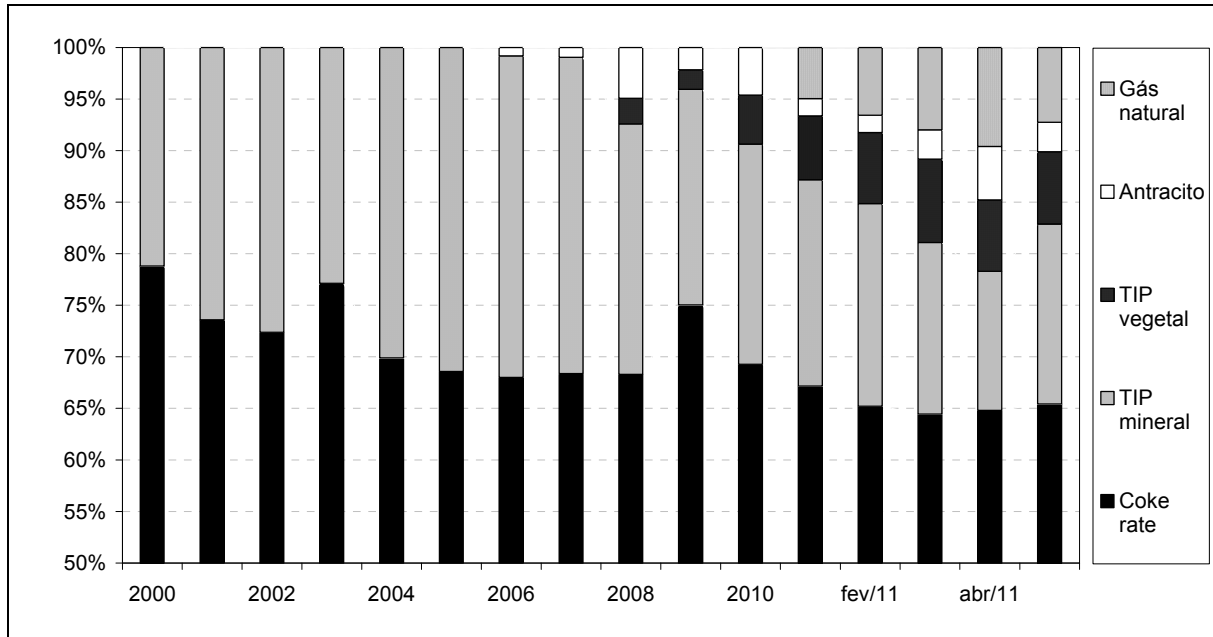


Figura 4. Histórico do consumo percentual de combustíveis no AF-A.

O uso de gás natural alterou a composição do gás de topo (Figura 5).

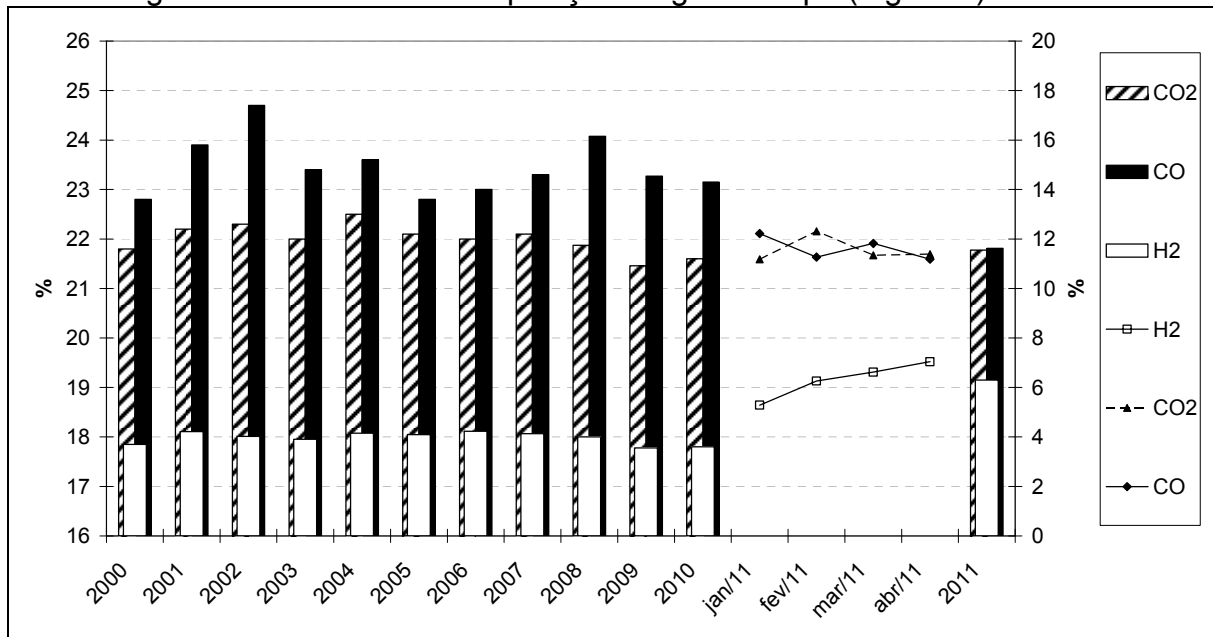


Figura 5. Composição do gás de topo do AF-A desde o início de operação.

Conforme esperado, a injeção de gás natural elevou a concentração de H_2 do gás contribuindo para uma melhora importante na eficiência gasosa com redução do CO. O saldo da elevação do H_2 e redução do CO foi positivo para o PCI do gás de alto-forno que apresentou elevação em torno de 30% contribuindo para a redução do consumo de outros combustíveis em toda a usina.

Visando manter a temperatura de chama em valores próximos a $2.100^\circ C$, alteraram-se os parâmetros de sopro. O enriquecimento do ar soprado em oxigênio que nos últimos anos não ultrapassava 4,7% foi elevado para valores acima de 5% e com isso a vazão de ar pode ser reduzida. A elevação do PCI do gás aliada a redução da vazão propiciou uma elevação da temperatura de sopro da ordem de $50^\circ C$. A umidade do ar soprado foi reduzida em valores de ordem de $6 g/Nm^3$. Outro impacto

interessante foi a redução do consumo de N_2 com a redução da taxa de injeção pulverizado.

Mesmo assim, percebe-se uma queda na temperatura de chama e do aporte térmico na região de elaboração. Este fato se reflete na queda da temperatura de gusa para um mesmo patamar de teor de silício do gusa (Figura 6).

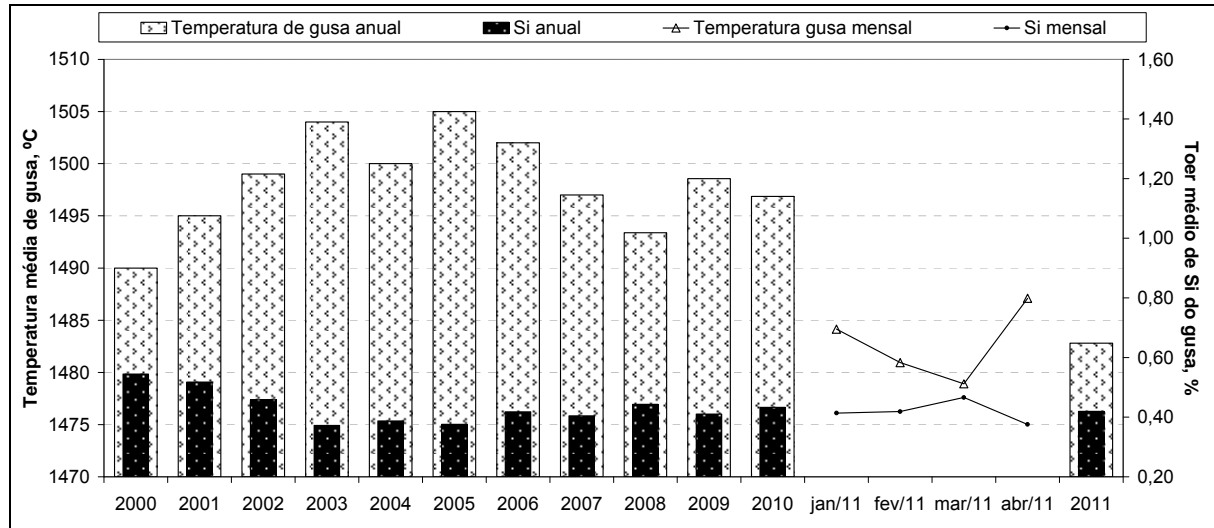


Figura 6. Temperatura e silício do gusa produzido no AF-A.

Um efeito colateral sentido com o uso do gás natural foi a elevação das temperaturas dos *staves* no anel 5, que é aquele que fica logo acima do nível das ventaneiras. A ignição do gás natural injetado em alto-forno ocorre a temperaturas próximas a 1.000°C .⁽¹⁰⁾ A injeção de gás em posições como as das lanças de carvão conduzem o gás natural para a região acima da ventaneira, elevando a perda térmica nessa região, aumentando a concentração de hidrogênio próximo à parede e reduzindo a eficiência de redução do gás.⁽¹⁰⁾ Alternativas estão sendo estudadas para evitar este tipo de ocorrência.

É possível perceber também uma queda na taxa de substituição na medida em que a injeção de gás natural foi elevada. Taxas de substituição da ordem de 1,2 kg a 1,3 kg de coque para cada kg de gás natural quando este é injetado a 20 kg/t, caem para valores próximos a 0,95 kg de coque para cada kg de gás natural quando a injeção de gás é elevada para 50 kg/t com injeção de pulverizados de 110 kg/t. Isto é explicado uma vez que quando se injeta um volume maior de gás com o mesmo tipo de lança reduz a relação área/volume do jato. Desta forma, o aquecimento do gás natural no jato principal é prejudicado reduzindo a taxa de combustão no *raceway* levando a uma piora na eficiência do H_2 .⁽¹⁰⁾

O saldo de redução na emissão do CO_2 pela utilização de moínha de carvão vegetal e pela injeção de gás natural é mostrado na Figura 7. O total de redução equivale a 416.000 t de CO_2 que deixaram de ser emitidos para a atmosfera.

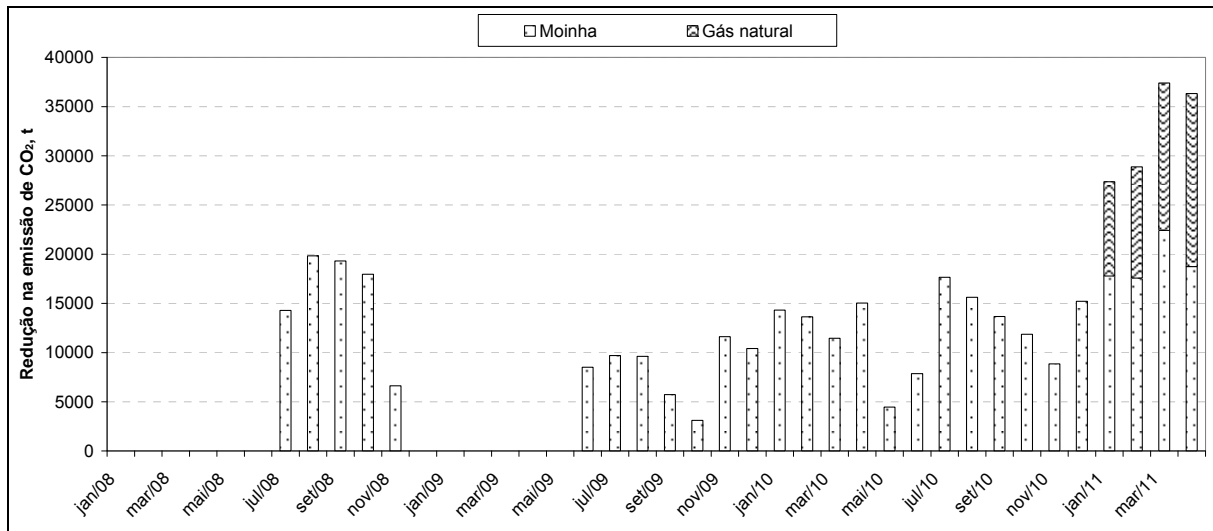


Figura 7. Redução na emissão de CO₂ calculada na produção de gusa em Monlevade com o advento da injeção de moinha de carvão vegetal e de gás natural.

6 CONCLUSÕES

As constantes oscilações de preços das matérias-primas têm forte impacto sobre os custos operacionais de uma usina siderúrgica. A capacidade de se adaptar e responder com agilidade a essas variações pode definir a competitividade em um mercado globalizado como o atual.

A injeção de moinha de carvão vegetal se consolidou ao longo dos dois últimos anos em Monlevade. Diversas alterações no processo ao longo desse período contribuíram para reduzir os efeitos negativos da baixa densidade do material para a produção de carvão pulverizado. Suas vantagens estão relacionadas principalmente ao baixo custo quanto comparado com o coque e o carvão mineral, a disponibilidade do material dentro do grupo, ao comportamento do material no processo do alto-forno devido à composição química das cinzas e da morfologia das partículas e, finalmente, por reduzir a emissão de CO₂ em toda a cadeia.

Desde janeiro de 2011, através de um projeto desenvolvido internamente por sua equipe em um curto período de tempo, a ArcelorMittal Monlevade tem a possibilidade de injetar gás natural no Alto-Forno "A". Os resultados obtidos foram acima do esperado conseguindo atingir uma taxa de injeção de gás natural média de até 48 kg/t, taxa de injeção total de 165 kg/t com redução expressiva no *coke rate*. Ganhos secundários foram obtidos com a elevação do PCI do gás de alto-forno, redução do consumo de vapor no controle de temperatura de chama e principalmente na possibilidade de elevação da participação da moinha no mix de pulverizados injetado. Além disso, o uso de gás natural gerou uma redução importante da emissão de CO₂ na produção de gusa.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que estiveram envolvidos no desenvolvimento do projeto os quais destaco a seguir. À toda equipe da GAPGU em especial ao Luciano de Oliveira Mol, Carlos Gomes, Haroldo Lacerda de Brito. Agradeço também à equipe de engenharia e utilidades principalmente o Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro, Eduardo Sérgio da Silva Gonçalves, Luiz Flávio Mourão Arantes e Robson Martins Soares. À equipe da GAMRE, destacando-se o Saulo Oliveira Melo, José Mendes da Cruz e

Ismael Ferreira da Silveira e pela parte de automação ao Fernando Lúcio Araújo Silva. Destaco também a contribuição importante do Thiago Público da Rocha Teixeira e do Wander de Oliveira Borges e demais colegas da GERED. Agradecimento especial à GASMIG que atuou como parceira no projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 BORGES, W. O. et alli. ; An overview of blast furnace “A” performance at ArcelorMittal Monlevade, Brazil. ATS, 2007, Paris, France.
- 2 ANDRADE, F. C.; dos SANTOS, R. J.; BORGES, W. O.; Evolução da operação do Alto-Forno “A” da ArcelorMittal Monlevade com elevada participação de small coke na carga redutora. 39º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS. São Paulo: ABM, 2009.
- 3 MARQUES, M. B.; PIMENTA, F. V.; Injeção de moinha de carvão vegetal no Alto-Forno “A”. 40º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS. Agosto de 2010. Belo Horizonte. São Paulo: ABM, 2010.
- 4 DEFENDI;G. A.; Caracterização da cinética de reação e comportamento das cinzas dos carvões minerais injetados através das ventaneiras dos Altos-Fornos da CST. Belo horizonte. EEUFMG, 2006.
- 5 BABICH, A. et alii – Charcoal Behaviour by Its Injection into the Modern Blast Furnace. ISIJ International, vol. 50, n.1, p. 81-88, 2010.
- 6 HYLE, F. W.; Fuel injection in the blast furnace. McMaster. BF course. 2006.
- 7 ROGERS, B. E.; SMITH, M. R.; Increased use of natural gas in blast furnaces in North America. Union Gas Limited, Canada.
- 8 STEILER, J.; Metal – Slag – Gas reactions in the Blast Furnace. ArcelorMittal University Course. France, 2011.
- 9 LINGIARDI, O. et alli.; High productivity and coke rate reduction at Siderar Blast Furnace 2.1st International Meeting on Ironmaking. September 2001. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- 10 TOVAROVSKIY, I. G. et alli; Optimization of tuyere parameters for natural gas injection and control heterogeneity of blast furnace operation. ISSTech, 2003. Indianapolis, Indiana. p. 805-816.