

ESTUDO NUMÉRICO DA RECICLAGEM DE CO₂ NA ZONA DE COMBUSTÃO DO ALTO FORNO

Jose Adilson de Castro ¹
Anderson William de Souza Baltazar ¹

Resumo

Altos fornos produzem gases com poder calorífico relativamente elevado que são comumente utilizados no interior da usina. Entretanto, o gás rico em CO₂ não tem aplicação sendo descartado na atmosfera. Portanto, é desejável que a geração específica de gás de alto forno seja minimizada, pois contribuiria para a diminuição do aquecimento global. Neste estudo, é utilizado um modelo total do alto forno para avaliar a possibilidade de injeção de CO₂ nas ventaneiras utilizando-se do excesso de entalpia nessa região do alto forno, visando incrementar as reações de gás d'água e *solution loss*, gerando gás redutor para o processo. O modelo total do alto forno é baseado em equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas em sistemas multifásicos, a saber: gás, sólidos, gusa, escória e fases pulverizadas. São selecionados quatro casos de análise com injeção de CO₂ e o enriquecimento em oxigênio do sopro é ajustado visando operação estável do processo. Resultados de simulação indicam que a produtividade pode ser aumentada em torno de 15% devido ao efeito combinado de alto consumo de PCI, via *solution loss*, e aumento de geração do gás redutor no forno.

Palavras-chave: Altos-fornos; Reciclagem; Dióxido de carbono; Simulação computacional.

NUMERICAL STUDY OF CO₂ RECYCLING INTO THE COMBUSTION ZONE OF THE BLAST FURNACE

Abstract

The blast furnaces process produces gases with relative high calorific value, which is commonly used in the steelmaking facilities. However, CO₂ rich gas has not application and it is desirable to minimize its emission due to global warming effects. In this investigation, a total model of the blast furnace is used to analyze the injection of CO₂ into the blast furnace tuyeres promoting water shift reaction and solution loss, which, in turn, generates reducing gas to the blast furnace process. The total blast furnace model is based on transport equations of *momentum*, energy and chemical species for solids, gas, hot metal, slag and pulverized phases. Four cases are selected with CO₂ recycling and blast volume together with oxygen enrichment adjustment in order to keep smooth operation. For the cases of high CO₂ injection burden distribution is changed aiming at promoting better gas flow conditions. Simulated results indicate that productivity could be increased around 15% due to the combined effect of higher consumption on PCI via solution loss and higher reducing gas generation on the lower part of the furnace.

Key words: Blast furnace; Recycling; Carbon dioxide; Computational simulation.

I INTRODUÇÃO

Ao se injetar CO₂ diretamente na zona de combustão do alto forno, o CO₂ em contato com o carbono do PCI e do coque tende a promover reações de formação de CO, principalmente através das reações de *solution loss* e gás d'água, que são fortemente endotérmicas, o que poderia causar excessivo abaixamento da temperatura de chama. Porém, em moderadas quantidades, a injeção de CO₂ seria possível devido ao excesso de energia do gás que sai da zona de combustão. Os aspectos mais relevantes

para viabilizar esta tecnologia de injeção seriam o controle da quantidade injetada e da distribuição de temperaturas no interior do reator, não permitindo que as mesmas diminuam excessivamente em locais como nas regiões à frente da zona de combustão. Isso poderia provocar a formação de “ninhos de pássaros” e zona de gotejamento de escória, o que promoveria a elevação de sua viscosidade e, conseqüentemente, retenção de líquidos, deteriorando as condições de escoamento.

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica – PPGEM, Universidade Federal Fluminense – UFF. Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, Cep 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: adilson@metal.eeimvr.uff.br, anderson@metal.eeimvr.uff.br.

mentos gasoso, líquidos e da fase pulverizada na zona inferior do forno. Outro aspecto também de alta relevância seria a possibilidade das reações de *solution loss* e gás d'água ocorrerem preferencialmente com o carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras, o que preservaria o coque nessa região. A reutilização parcial do gás de topo no processo apresenta-se como uma opção atrativa, embora atualmente restrita ao reaproveitamento do potencial redutor do gás de topo reformado. Estudos que combinam modelos analíticos e simulação computacional para previsão de utilização do gás de processo no alto forno são escassos. Um dos exemplos de estudos dos mais relevantes relacionados ao tema foi publicado por Nogami *et al.*⁽¹⁾ em que concluem ser possível a reciclagem de gás de topo combinado com gás natural e carregamento de sucata. Andahazy *et al.*⁽²⁾ estudaram a injeção de gases redutores como gases ricos em H₂, CO e CH₄ e concluíram que seria possível sua utilização. A injeção de CO₂ nas ventaneiras não tem sido cogitada devido ao seu reconhecido efeito fortemente refrigerante da zona de combustão.

Este trabalho visa estudar condições possíveis de operação do alto forno que potencializem a reutilização do gás CO₂. Considera-se que o gás de topo seria tratado e somente o CO₂ seria reutilizado. Isto permitiria uma reciclagem mais eficiente com um volume menor de injeção. O gás injetado combinado à diminuição da injeção de vapor e enriquecimento em oxigênio do sopro permite um controle da temperatura na zona de combustão com aumento de geração de gás redutor. Para os casos de alto volume de injeção, a distribuição de carga pode ser alterada de forma a possibilitar melhor distribuição do fluxo gasoso. Para serem realizados estudos desta natureza é conveniente a utilização de simuladores de processo que se baseiam em fenômenos de transporte como ponto de partida, pois possibilitam a quantificação de fenômenos interligados, onde estudos isolados, em geral não representam as possíveis combinações e interações. Neste trabalho, é adaptado um modelo 3D, estacionário do alto forno, previamente desenvolvido pelos autores, para considerar injeção secundária. O modelo é baseado em equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas em sistemas multifásicos multicomponentes, em que modelos semi-empíricos são utilizados para quantificar as múltiplas interações entre fases.

2 METODOLOGIA

Objetivando simular os fenômenos internos do processo alto forno este trabalho elabora um modelo 3D estacionário que simula as condições locais de escoamento, trocas térmicas e químicas, em um domínio que envolve desde a superfície de escória, no cadinho, até a superfície de carregamento, na goela. O modelo consiste em formular os fenômenos internos do reator por meio de equações de transporte de momento energia e espécies químicas para cada fase envolvida. Neste estudo são consideradas cinco fases. Para a fase gás são considerados o sopro nas ventaneiras, a injeção auxiliar de CO₂ e os demais gases gerados internamente por reações, tais como: combustão e gaseificação, redução dos constituintes da carga via gases redutores e reações de formação de álcalis e gás SiO. A segunda fase é o sólido carregado pelo topo, sendo consti-

tuído de minério granulado, pelota, sinter, coque e *small coque*. O gusa e a escória são considerados nas 3^a e 4^a fases, respectivamente, enquanto que a 5^a fase constitui o carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras.

As fases consideradas neste modelo são caracterizadas por fases contínuas e fases discretas. Como fase contínua considera-se gás e leito granular, pois transmitem tensões e o escoamento é direcionado pelo gradiente de pressão. No caso das fases discretas - gusa, escória e carvão pulverizado - o movimento é devido às forças gravitacionais e interações com outras fases. Entretanto, independentemente de se caracterizarem por fases contínuas e discretas pode-se estabelecer balanços de forças, energia e espécies químicas no interior de um volume de controle imaginário no interior do alto forno. Outro ponto bastante importante com relação a esta formulação é a possibilidade de coexistência de todas as fases no interior do volume de controle, sendo sua partição caracterizada por sua fração volumétrica. A Figura 1 mostra as possíveis interações entre as fases e um volume de controle típico para realizar os balanços de energia, *momentum* e espécies químicas para cada fase presente.

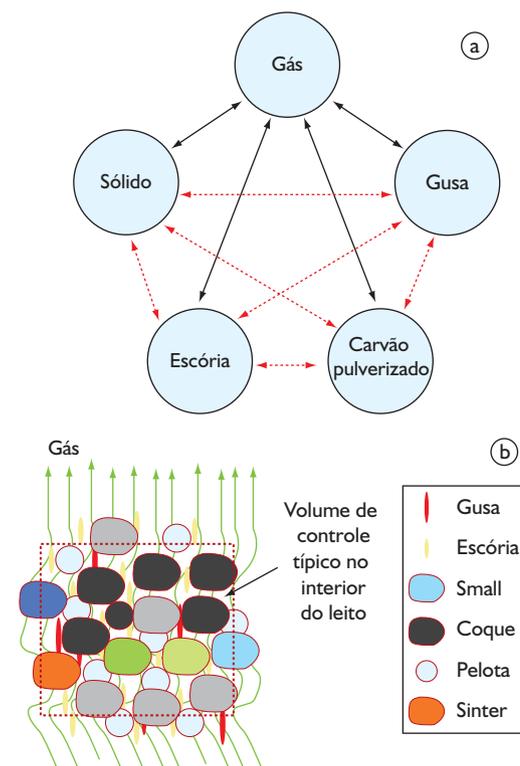


Figura 1. Interação entre as fases no interior do alto forno e volume de controle para formulação das equações de conservação. a) Diagrama de interações multifásicas; e b) Co-existência de múltiplas fases no interior de um volume de controle.

A Equação 1 sintetiza o balanço de todas as grandezas listadas na Tabela 1, em que os índices i referem-se às fases e k , às variáveis envolvidas no balanço, como: espécies químicas pertencentes à fase i , componentes de velocidades (u) e entalpias (H). ρ e ε representam as massas específicas e frações volumétricas das fases, respectivamente, enquanto Γ é a difusividade efetiva, que pode representar viscosidade dinâmica, para o caso das equações de *momentum*, difusividades térmicas quando se tratam das equações de entalpia ou difusividade molecular para as equações de balanço de espécies químicas. Nesta equação, o termo do lado esquerdo quantifica a convecção, enquanto o 1º termo do lado direito é a contribuição devido à difusão e o segundo agrupa os chamados termos fontes. Os termos fontes assumem formulações particulares conforme a fase e as grandezas conservadas. Surgem principalmente da necessidade de incorporar nos balanços as interações entre as fases devidas a forças de contato, gravidade e reações químicas. Detalhes das formulações dos diversos termos fontes devidos aos balanços de *momentum*, energia e cinética química são encontradas em Yagi; ⁽³⁾ Austin, Nogami e Yagi⁽⁴⁾ e Castro, Nogami e Yagi:⁽⁵⁻⁷⁾

$$\text{div}(\rho_i \varepsilon_i \bar{U}_i \phi_{i,k}) = \text{div}(\Gamma_{\phi_{i,k}} \text{grad}(\phi_{i,k})) + S_{\phi_{i,k}} \quad (1)$$

Tabela 1. Variáveis consideradas na solução do modelo multifásico ($\phi_{i,k}$)

Fases	Espécies químicas consideradas nas fases	
Gás ($u_1, u_2, u_3, P_g, H_g, \varepsilon_g$)	$N_2, O_2, CO, CO_2, H_2, H_2O, SiO, SO, SO_2$	
Sólidos ($u_1, u_2, u_3, P_s, H_s, \varepsilon_s$)	Granulado	$Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO, Fe, H_2O, SiO_2, Al_2O_3, MgO, MnO, ganga$
	Coque	$C, \text{voláteis}, SiC, SiO_2, Al_2O_3, MgO, S, FeS, CaO$
	Pelota	$Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO, Fe, H_2O, SiO_2, Al_2O_3, MgO, MnO, ganga$
	Sinter	$Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO, Fe, H_2O, SiO_2, Al_2O_3, MgO, MnO, ganga$
Gusa ($u_1, u_2, u_3, H_{gusa}, \varepsilon_{gusa}$)	Fe, C, Si, S, P, Mn	
Escória ($u_1, u_2, u_3, H_{escoria}, \varepsilon_{escoria}$)	$FeO, SiO_2, Al_2O_3, MgO, ganga, CaO$	
Carvão pulverizado ($u_1, u_2, u_3, H_{pci}, \varepsilon_{pci}$)	$C, \text{voláteis}, SiC, SiO_2, Al_2O_3, MgO, S, FeS, CaO$	

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da operação do alto forno operando com injeção auxiliar de CO_2 foi conduzida por meio de cinco condições operacionais distintas:

- Caso Base: corresponde a uma operação atual do alto forno;
- Caso 1: 6,5% de enriquecimento em oxigênio combinado com 11,4 Nm^3 de CO_2 /tgusa;
- Caso 2: 8,7% de enriquecimento e 56 Nm^3 de CO_2 /tgusa;

- Caso 3: 11,3 % de enriquecimento e 79 Nm^3 de CO_2 /tgusa; e
- Caso 4: com 16% de enriquecimento e 103 Nm^3 de CO_2 /tgusa.

O principal objetivo da seleção dos casos apresentados é comparar novas possibilidades com condições atuais de operação do processo. São selecionados um caso base e quatro casos para análise com crescente injeção de CO_2 e oxigênio. Os resultados são obtidos após tentativas de ajustes no sopro e distribuição de carga cujos resultados de simulação apresentaram operações estáveis indicados pelo fechamento do balanço de massas (erro percentual < 0,1) e equilíbrio térmico local de todas as fases previstas. Na Tabela 2, são apresentados os principais parâmetros operacionais para os casos que indicaram estabilidade operacional. Como pode ser observado na Tabela 2, o modelo indica que até em torno de 100 Nm^3/t a operação seria estável. O gás de topo indica um ligeiro aumento do teor de CO_2 , porém, o teor de CO aumenta também proporcionalmente e não altera significativamente o seu poder calorífico. Os resultados mostram um aumento na produtividade devido à necessidade de enriquecimento em oxigênio do sopro aliado ao esperado incremento da redução na cuba superior.

A Figura 2 apresenta a distribuição de temperatura interna para os casos analisados. Nela são observadas poucas mudanças no perfil térmico como um todo, exceto na região das ventaneiras.

Na Figura 3 são detalhadas as condições térmicas das regiões de combustão para os casos críticos comparativamente ao caso base. Observa-se que a temperatura da zona fria é significativamente expandida para o caso de alta injeção de CO_2 . O posicionamento da zona coesiva e o fluxo de sólidos no interior do alto forno são mostrados na Figura 4. Pequenas alterações são observadas no posicionamento da zona coesiva, embora a região da zona de combustão tenha sofrido significativa modificação. Este fato se justifica pela mudança na distribuição da carga (foi realizado um carregamento mais central de coque no caso 4) e distribuição do gás na zona de gotejamento devido ao aumento do fluxo de líquidos com aumento de produtividade.

Os aspectos mais relevantes deste estudo são sumarizados nas Figuras 5 e 6, onde são apresentadas as emissões de CO_2 por tonelada de metal produzido e as parcelas de consumo de carbono via *solution loss* com carvão pulverizado e coque. As emissões específicas de CO_2 e gás de

Tabela 2. Parâmetros operacionais calculados pelo modelo

Parâmetros	Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
CO ₂ (Nm ³ /t _{gusa})	0	11,4	56,5	78,9	103,3
Produtividade (t _{gusa} /m ³ /dia)	2,21	2,20	2,54	2,90	3,20
Enriquecimento de O ₂ (%) (dado de entrada)	5,7	6,4	8,7	11,27	15,6
Sopro (Nm ³ /min) (dado de entrada)	6149	6149	5998	5995	5965
Temperatura de sopro (°C) (dado de entrada)	1250	1250	1250	1250	1250
Injeção de carvão (kg/t _{gusa})	213,0	212,9	212,8	213	213
Eficiência de combustão (%)	99	92,5	100	100	100
Consumo de coque (kg/t _{gusa})	206,2	206,5	208,6	210,7	210,2
Consumo de small coque (kg/t _{gusa})	63,7	63,8	64,3	65,2	63,7
Consumo total de redutor/combustível (kg/t _{gusa})	482,2	483,3	485,7	488,9	485,7
Gás de topo					
CO ₂ (%)	25,2	26,5	27,9	29,1	31,2
CO (%)	18,4	18,4	22,1	24,3	27,1
H ₂ (%)	7,3	7,6	7,8	8,3	7,9
H ₂ O (%)	4,1	4,5	3,6	3,6	3,9
Temperatura (°C)	198	179	183	174	151

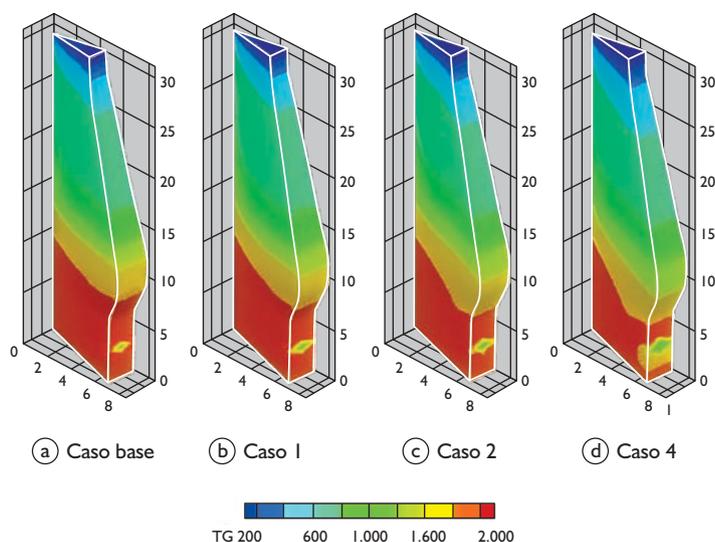


Figura 2. Previsão da temperatura interna do alto forno.

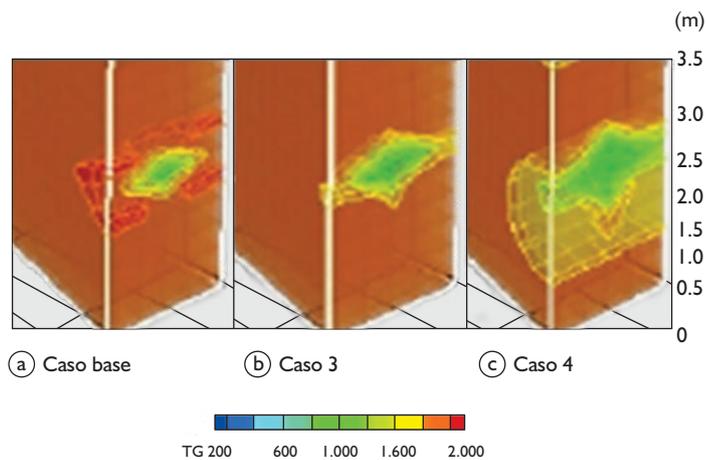


Figura 3. Posicionamento da zona de combustão no interior do alto forno (alcance do resfriamento causado pela reação de *solution loss* no carvão pulverizado).

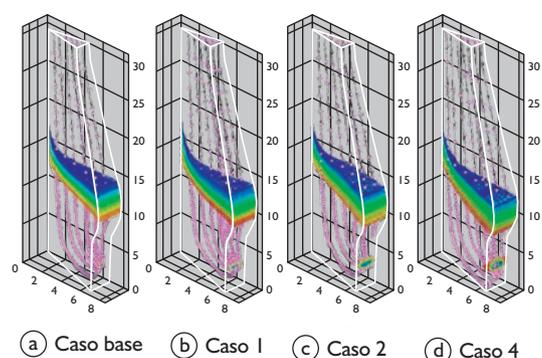


Figura 4. Previsões de posicionamento da zona coesiva e trajetória dos sólidos no interior do alto forno. Intervalo de tempo entre = 30 minutos.

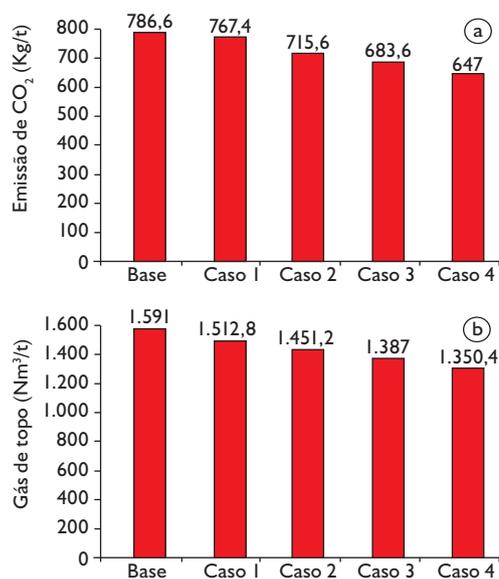


Figura 5. Previsão de produtos gasosos referentes à produção de 1 t de gusa. a) Emissão específica de CO₂; e b) Gás de topo.

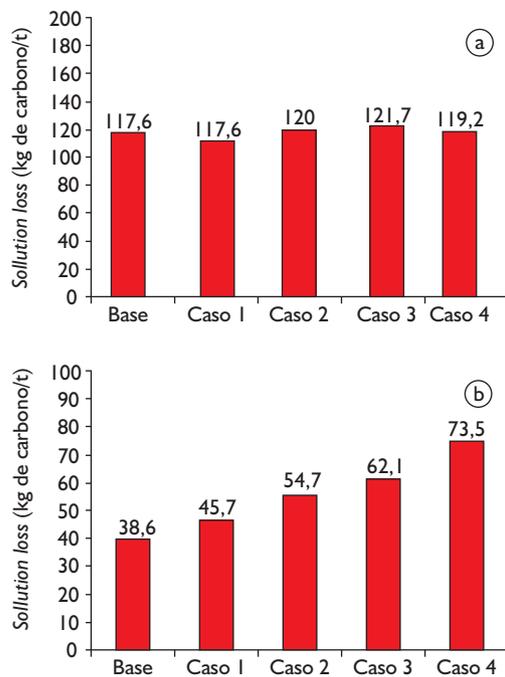


Figura 6. Previsão de consumo de carbono via reação de *solution loss*. a) Coque + *small coque*; e b) Carvão pulverizado.

topo decrescem continuamente para os casos analisados, indicando que a técnica de injeção de CO_2 com enriquecimento de oxigênio é efetiva para diminuir emissões do alto forno. Na Figura 6 apresentam-se os consumos de carbono do coque e carvão pulverizado via *solution loss* por tonelada de gusa produzida. Observa-se que, para os casos analisados, pequenos incrementos são observados para o coque (aproximadamente 2 kg) enquanto para o carvão pulverizado observa-se um crescente incremento de consumo atingindo aproximadamente 35 kg por tonelada de gusa no caso de maior injeção.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho investiga o desempenho do alto forno operando com altas taxas de injeção de gás e carvão pulverizado. O modelo é baseado em equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas de cinco fases coexistindo simultaneamente no interior do reator. A recirculação de gás de topo

REFERÊNCIAS

- 1 NOGAMI, H.; YAGI, J.; KITAMURA, S.; AUSTIN P.R. Analysis on material and energy balances of iron making systems on blast furnace operations with metallic charging, top gas recycling and natural gas injection. *ISIJ International*, v. 46, n. 12, p. 1759-66, Dec. 2007.
- 2 ANDAHAZY, D.; LOFFLER, G.; WINTER, F.; FEILMAYER, C.; BURGLER, T. 2005, Theoretical analysis on the injection of H_2 , CO , CH_4 rich gases into the blast furnace. *ISIJ International*, v. 45, n. 2, p. 166-74, Feb. 2005.
- 3 YAGI, J. Mathematical modeling of the flow of four fluids in a packed bed. *ISIJ International*, v. 33, n. 6, p. 619-39, June 1993.
- 4 AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H.; YAGI, J. A mathematical model for blast furnace reactions analysis based on the four fluid model. *ISIJ International*, v. 37 n. 8, p. 748-55, Aug. 1997.

com enriquecimento de oxigênio mostra-se uma técnica promissora. Baseado nos resultados de simulação, são enfatizadas as seguintes conclusões:

- a produtividade do processo pode ser aumentada até 35% combinando-se enriquecimento de oxigênio da ordem de 15% com recirculação de aproximadamente $100 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{gusa}}$ de CO_2 ;
- a emissão específica de CO_2 pode ser diminuída em aproximadamente 18%;
- o *fuel rate* é levemente aumentado em $3 \text{ kg}/\text{t}_{\text{gusa}}$ e o silício do gusa decresce para aproximadamente 0,15%.

De uma forma geral, os campos de temperatura e o fluxo gasoso no interior do alto forno mostram-se comparáveis à condição de operação estável (caso base); entretanto, no caso mais crítico de $100 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{gusa}}$ é possível identificar uma extensão maior do resfriamento da zona de combustão, o que poderia causar formação de “ninhos de pássaros” nestas regiões. Por outro lado, para os casos analisados não é possível identificar formação de direcionamento de fluxo gasoso nesta região, o que indicaria que a escória com baixa temperatura estaria sendo expulsa da região pelo fluxo de gás. Porém, embora os resultados da simulação indiquem que a introdução de $100 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{gusa}}$ de CO_2 seria possível, por cautela recomenda-se como condição ótima o caso 3, com introdução de aproximadamente $80 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{gusa}}$ de CO_2 .

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (PQ e Universal), à CAPES (bolsa de doutorado) e FAPERJ (jovem cientista do estado e Grupos emergentes) pelo apoio financeiro.

- 5 CASTRO, J.A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Numerical analysis of multiple injection of pulverized coal, prereduced iron ore and flux with oxygen enrichment to the blast furnace. *ISIJ International*, v. 41, n. 1, p.18-24, Jan. 2001.
- 6 CASTRO, J.A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Numerical investigation of simultaneous injection of pulverized coal and natural gas with oxygen enrichment to the blast furnace. *ISIJ International*, v. 42, n. 11, p. 1203-11, Nov. 2002.
- 7 CASTRO, J.A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high PCI operation. *ISIJ International*, v. 40, n. 7, p. 637-46, Jul. 2000.

Recebido em: 6/04/2009

Aprovado em: 19/08/2009