

OTIMIZAÇÃO NA ESTIMATIVA DE FIM DE SOPRO EM CONVERSOR DE SOPRO COMBINADO ATRAVÉS DE MODELO ESTÁTICO ¹

Elsomar Biancardi Guimarães de Oliveira ²
Alexandre Furtado Ferreira ³

Resumo

No presente trabalho é apresentada uma técnica para otimização dos teores de Manganês e Fósforo e Temperatura de Fim de Sopro em Conversor de Sopro Combinado, assim como suas limitações e perspectivas de aplicação. As equações empíricas obtidas via técnica de regressão de multivariáveis são obtidas para faixas mais restritas de seus teores. Em função desta análise, um modelo matemático baseado em balanço de massa e térmico será desenvolvido visando avaliar a possibilidade de aprimorar esta capacidade de previsão. A formulação deste modelo e um ajuste preliminar a dados industriais são apresentados e discutidos, salientando-se as principais limitações e dificuldades na aplicação desta metodologia.

Palavras-chave: Modelo matemático; Aciaria; Controle.

OPTIMIZATION IN THE ESTIMATE OF END OF BLOW IN CONVERTER OF BLOW COMBINED THROUGH STATIC MODEL

Abstract

In the present work a technique is presented for optimization of the contents of Manganese and Phosphorus and Temperature of End of Blow in Converter of Combined Blow, as well as their limitations and application perspectives. The equations obtained empiric road technique of multivariables regression are obtained for more restricted strips of their contents. As result of this analysis, a mathematical model based on mass balance and thermal it will be developed seeking to evaluate the possibility to perfect this forecasting capacity. The formulation of this model and a preliminary adjustment to industrial data are presented and discussed, and the main limitations and difficulties in the application of this methodology are highlighted.

Key words: Mathematical model; Steel mill; Control.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Graduação em Engenharia Metalúrgica - EEIMVR-UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ elsomar_b@hotmail.com*

³ *Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - EEIMVR-UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ furtado@metal.eeimvr.uff.br*

1 INTRODUÇÃO

As adições de manganês no vazamento representam um custo significativo para a aciaria. O conhecimento do teor de manganês no fim de sopro permite o uso do mínimo de ferro ligas, durante o vazamento, propiciando redução de custo.

O controle do fósforo é fundamental para atender os requisitos de qualidade dos aços de alto valor agregado como explicitado através de suas especificações. A estimativa do teor de fósforo no vazamento leva o operador a decidir pelo vazamento direto ou aguardar o resultado da última análise antes de executar o vazamento. A espera do resultado da análise resulta em diminuição da produtividade. A decisão errada, vazar a corrida quando ações para reduzir o fósforo seriam necessárias, resulta em corridas fora da faixa.

Atualmente, em muitas usinas, os teores de fósforo e manganês são estimados pelo operador do conversor com base nos parâmetros do modelo de controle estático do conversor, resultados das corridas anteriores e, eventualmente, resultados de temperatura e carbono obtidos pela sub-lança.

O objetivo deste trabalho é otimizar o modelo de controle estático. A estratégia adotada foi obter equações empíricas para os teores de fósforo e manganês de fim de sopro em faixas mais restritas, com isso objetivando um coeficiente de regressão maior quando comparado aos coeficientes para faixas de composições mais amplas. Desta forma, espera-se que as estimativas para fósforo e manganês sejam otimizadas. Os resultados do modelo de controle estático são comparados com resultados obtidos na análise de fim de sopro em conversor de sopro combinado.

2 MODELAMENTO MATEMÁTICO

O controle estático consiste em um balanço de massa e térmico, realizados antes do carregamento do conversor, a partir dos dados de entrada do conversor tais como temperatura, massa e composição do gusa, tipos de sucata e minério de ferro, desta forma estimativas são feitas para fósforo, manganês e temperatura de fim de sopro.

Com base na composição, temperatura e peso do gusa, da sucata e do aço final desejado, os balanços de massa e térmico são realizados iterativamente, até que uma solução para o peso do gusa, da sucata, do minério de ferro e quantidade de oxigênio a ser soprado seja encontrada.⁽¹⁾ O fluxograma do modelo é mostrado na Figura 1.

Parâmetros tais como teor de FeO na escória, oxigênio dissolvido no aço, temperatura do gás de exaustão, geração de poeira, razão entre os gases CO e CO₂, perdas térmicas e entre outros, precisam ser considerados.

O teor de FeO na escória e o oxigênio dissolvido no aço no fim de sopro, podem ser estimados por equações empíricas, onde seus respectivos teores são determinados em função do carbono de fim de sopro, através de uma equação ajustada a dados industriais.⁽²⁾

Um melhoramento nos modelos de controle estático é a utilização de dados de corridas anteriores para otimizar os parâmetros do modelo.

O controle estático não permite correções durante o sopro, sendo que a eficiência está na precisão das informações iniciais de carregamento. Seu acerto é dependente da precisão, do levantamento e transmissão dos dados: pesos, temperatura e composições químicas. Devido a fatores como incertezas nos dados

de carregamento, o modelo estático não atinge 100% de acerto. Dados do processo como temperatura do gás de exaustão, geração de poeira, perdas térmicas e razão entre CO e CO₂, também contribuem para dificultar as estimativas do controle estático, segundo Furtado.⁽¹⁾

O modelo de controle estático do conversor LD-KGC foi desenvolvido, através do uso do programa Excel, para prever a temperatura de fim de sopro. Este modelo utiliza os seguintes dados de entrada: - composição, temperatura e peso do gusa; - composição e peso das sucatas; - composição e peso do minério de ferro; - peso dos fundentes; - oxigênio soprado; - tempo de parada do conversor.

Os dados foram retirados de um conversor de sopro combinado LD-KGC com capacidade de 225 toneladas, com injeção de gás inerte na sua parte inferior.

2.1 Fluxograma do Modelo de Controle Estático

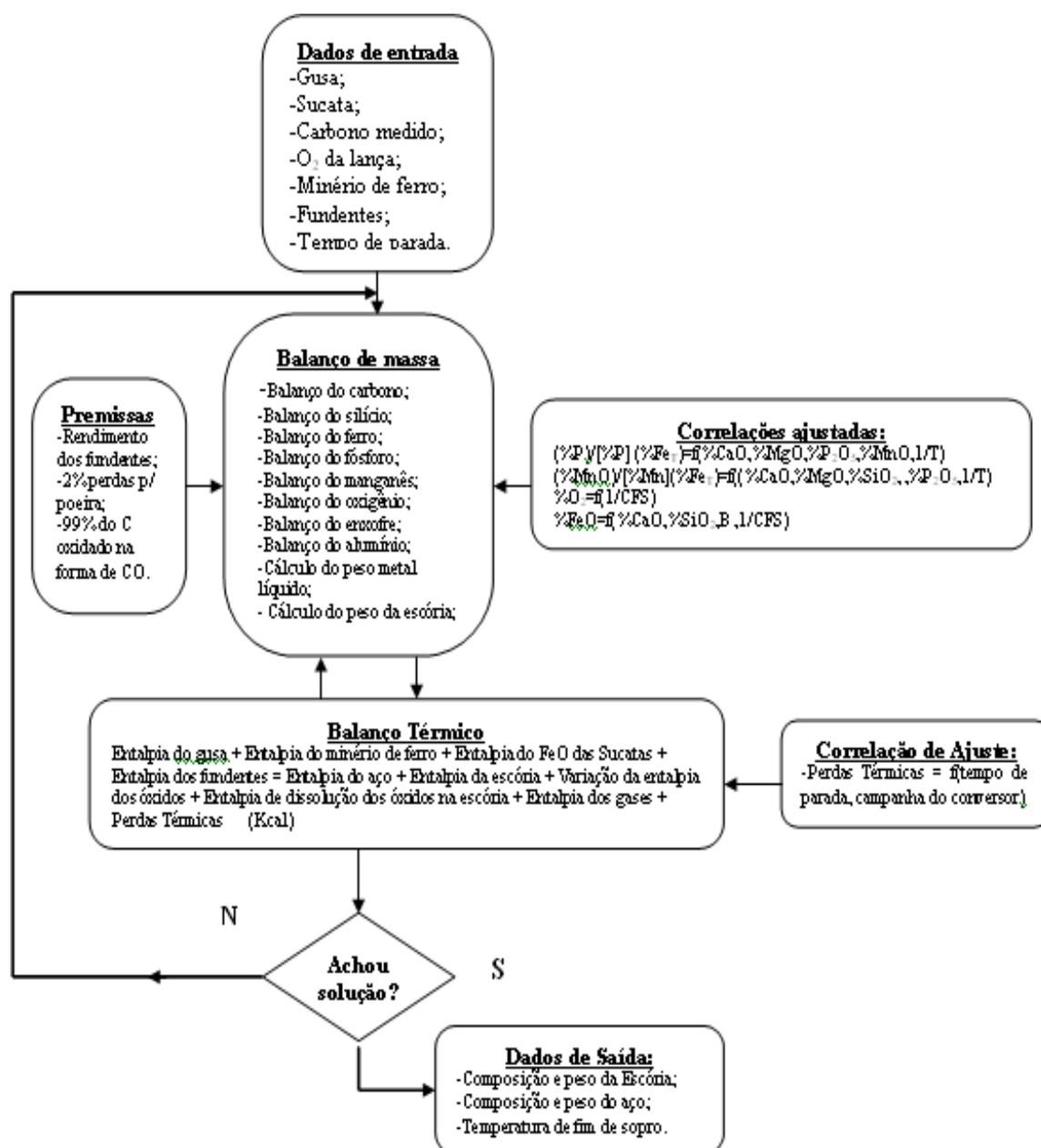


Figura 1 – Fluxograma do modelo

A Figura 1 se refere ao desenvolvimento do modelo de controle estático, onde foram formulados balanços de massa e térmico. O cálculo desses balanços é realizado de forma iterativa, até que uma solução para o fósforo e manganês no fim de sopro seja encontrada.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário o uso de premissas e equações empíricas.

As premissas consideradas pelo modelo são:

- a) O rendimento dos fundentes adicionados no conversor é de 90%;⁽³⁾
- b) 2% da carga metálica se perde como poeira;⁽⁴⁾
- c) 99% do carbono é oxidado na forma de CO.

Foram utilizadas fórmulas empíricas que melhor se ajustaram aos dados levantados de fim de sopro, como:

- Para a partição do fósforo, segundo Suito e Inque:⁽⁵⁾

$$\log \frac{(\%P)}{[\%P](\%Fe_T)} = 0,072[(\%CaO) + 0,3(\%MgO) + 0,6(\%P_2O_5) + 0,6(\%MnO)] + \frac{11570}{T} - 10,52 \quad (1)$$

- Para a partição do manganês, segundo Suito e Inque:⁽⁶⁾

$$\log K_{Mn} = -0,02[(\%CaO) + 0,23(\%MgO) + 0,28(\%Fe_T) - 0,08(\%P_2O_5)] + \frac{7300}{T} - 2,7 \quad (2)$$

- Para o oxigênio dissolvido no metal líquido, segundo Turkdogan:⁽²⁾

$$[ppmO] = -419,9 + \frac{256,8}{\sqrt{\%C}} \quad (3)$$

- Para o teor de FeO na escória, segundo Turkdogan:⁽²⁾

$$(\%FeO) = 64,63 - 0,69\%CaO - 1,06\%SiO_2 + 0,46B + \frac{0,041}{\%C_{FS}} \quad (4)$$

Como no fim de sopro metal e escória não atinge o equilíbrio termodinâmico, se faz necessário ajustar as equações (1), (2), (3) e (4). As equações (1) e (2) foram ajustadas para faixas mais restritas de seus teores, objetivando um melhor coeficiente de correlação. Assim, estimativas melhores para os teores de fósforo e manganês poderão ser obtidas.

As perdas térmicas foram determinadas a partir do calor perdido durante o tempo de parada do conversor e da campanha (número de corridas) do conversor. Estas perdas foram determinadas empiricamente, para os conversores em questão.

Os coeficientes das equações acima foram otimizados através do uso do método dos mínimos quadrados.

2.2 O Balanço Global

Mediante a utilização das entalpias, o balanço térmico global pode ser formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Entalpia do Gusa} + \text{Entalpia de Reação} + \text{Entalpia de Dissolução dos} \\
 & \text{Óxidos Formados na Escória} = \text{Entalpia do Aço Líquido} + \text{Entalpia da Escória} + \text{Entalpia dos Gases} + \text{Entalpia das Perdas Térmicas} + \\
 & \text{Entalpia do Minério de Ferro} \quad \quad \quad (\text{kcal})
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

A equação acima é uma equação linear com apenas uma incógnita: a temperatura de fim de sopro, que é obtida através de um cálculo iterativo entre o balanço de massa e térmico, até que uma solução para a temperatura de fim de sopro seja encontrada. A tolerância utilizada neste cálculo é de 10^{-3} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Estimativa do Teor de FeO

No presente trabalho, as primeiras tentativas de estimar o FeO utilizando uma única variável, o teor de carbono de fim de sopro, não foram boas, pois o coeficiente de correlação, “r”, era inferior a 0,5. Utilizando a variável proposta por Turkdogan ⁽²⁾, juntamente com as variáveis CaO, MgO e basicidade, o coeficiente de correlação aumentou consideravelmente, para $r = 0,70$.

O emprego destas variáveis é razoável, pois segundo Turkdogan ⁽²⁾, os teores de CaO, SiO₂ e a basicidade controlam o coeficiente de atividade do óxido de ferro. Os resultados destas estimativas são mostrados a seguir:

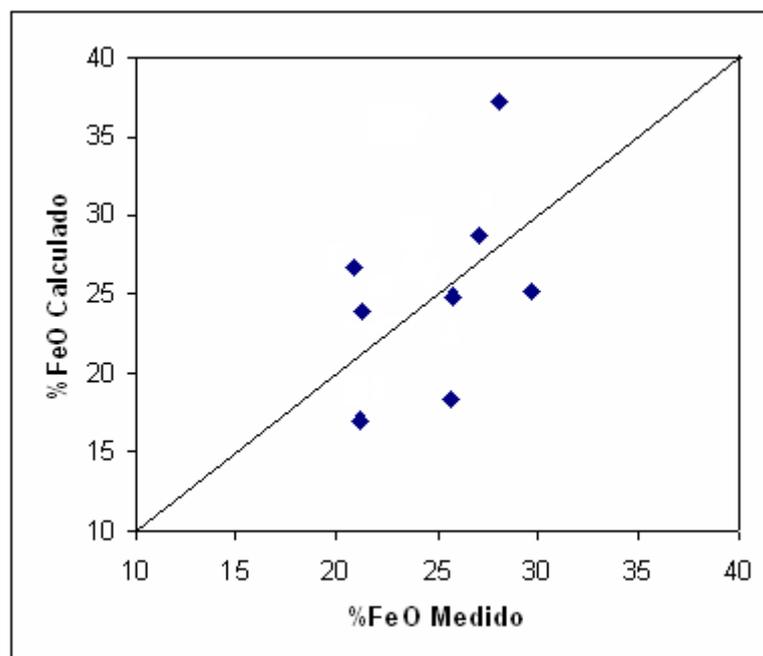


Figura 2 - %FeO previsto contra %FeO medido.

Observa-se nesta Figura 2 que algumas corridas apresentam desvios elevados para o teor de FeO no fim de sopro. As origens deste desvio podem estar associadas a incertezas e erros de difícil caracterização nos dados de entrada tais como, peso do gusa, composição do gusa e peso de fundentes, adicionados principalmente.

3.2 Estimativa do Teor de Fósforo no Fim de Sopro

A Figura 3 mostra a comparação entre os valores medidos e calculados pelo modelo de controle estático para o fósforo de fim de sopro. O fósforo estimado no fim de sopro também apresentou um índice de acerto baixo, tendo algumas corridas apresentado desvios expressivos. Estes desvios expressivos podem estar associados à estimativa de temperatura de fim de sopro, pois esta variável tem forte influência nos cálculos do fósforo de fim de sopro.

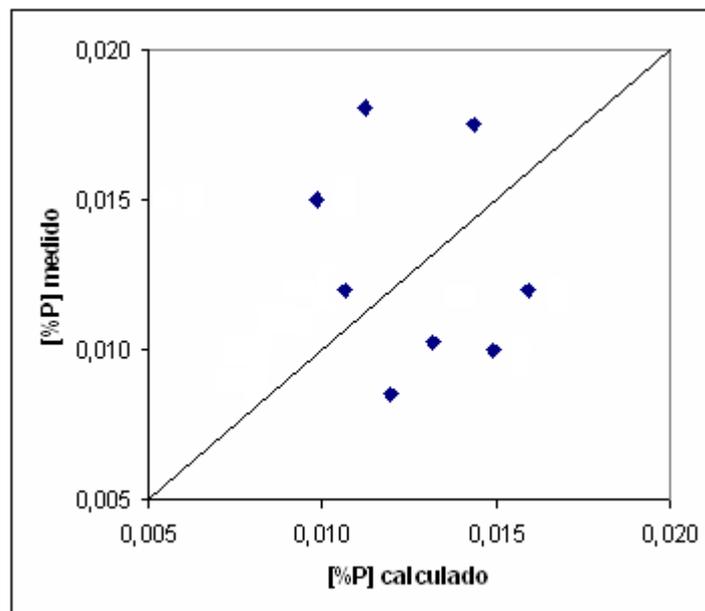


Figura 3 – Comparação dos resultados previstos pela equação (1) ajustada com os valores medidos de fim de sopro do conversor.

Observa-se nesta figura, que algumas corridas apresentaram desvios expressivos para a estimativa do fósforo de fim de sopro. Como a partição do fósforo também é obtida em função da composição da escória e temperatura de fim de sopro, mesmo que a temperatura tenha uma boa estimativa, se faz necessário que as demais variáveis tenham uma razoável estimativa dos seus teores no fim de sopro. As corridas que apresentaram os maiores desvios na estimativa de fósforo também foram às mesmas que tiveram desvios significativos na temperatura estimada e no peso do metal calculado. Isto pode influenciar os resultados na partição do fósforo.

3.3 Estimativa do Teor de Manganês no Fim de Sopro

Com relação ao teor de manganês de fim de sopro, o modelo mostrou um índice de acerto baixo. Isto pode ser explicado pela influência da temperatura, pois está variável é o termo de maior influência sobre a partição de manganês. Assim, é compreensível que as corridas que tiveram uma estimativa de temperatura de fim de sopro com um desvio expressivo do valor medido, tenham também um erro significativo na previsão do manganês. Este fato pode ser comprovado ao observar que as corridas que não obtiveram boas estimativas de temperatura de fim de sopro estão entre as que tiveram piores estimativas de manganês.

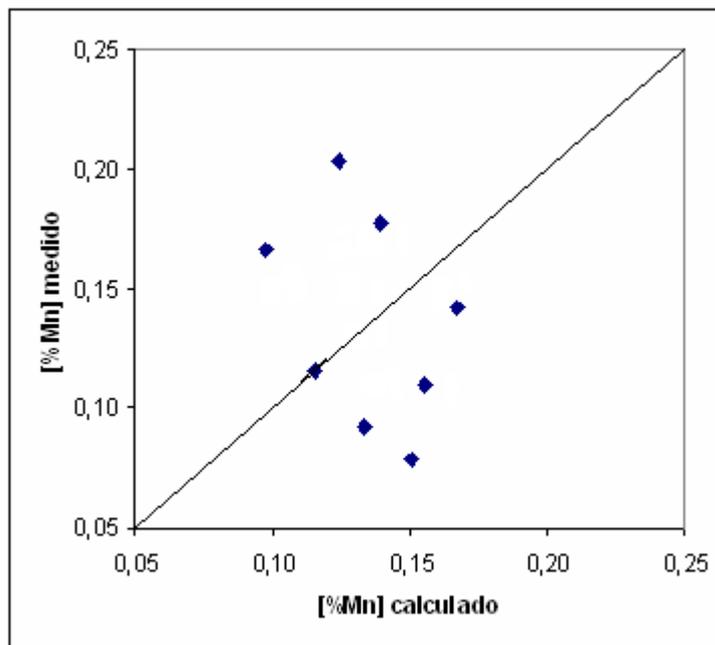


Figura 4 – Comparação dos resultados previstos pela equação (2) ajustada com os valores medidos de fim de sopro do conversor.

Como a partição de manganês obtida em função da temperatura de fim de sopro e da composição da escória, mesmo que a temperatura tenha uma boa estimativa, ainda se faz necessário que as demais variáveis tenham uma razoável estimativa de seus teores de fim de sopro.

3.4 Estimativa da Temperatura de Fim de Sopro

A Figura 5 mostra uma comparação entre as temperaturas medidas no fim de sopro do conversor e os valores calculados pelo modelo para a temperatura de fim de sopro.

Nesta figura, observa-se desvio expressivo de algumas corridas. Mas, em geral, a capacidade preditiva do modelo, neste estágio, é limitada. Observando-se desvios da ordem de $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Duas fontes importantes de incertezas devem contribuir para este resultado:

- 1 – Incertezas com relação à composição média real do gás e sua variação;
- 2 - Incertezas com relação a perdas térmicas no conversor.

Estes dados seriam muito importantes para determinar com maior precisão a temperatura no fim de sopro. Os valores calculados foram obtidos com uma composição do gás de 99% de CO, composição adotada no desenvolvimento deste trabalho.

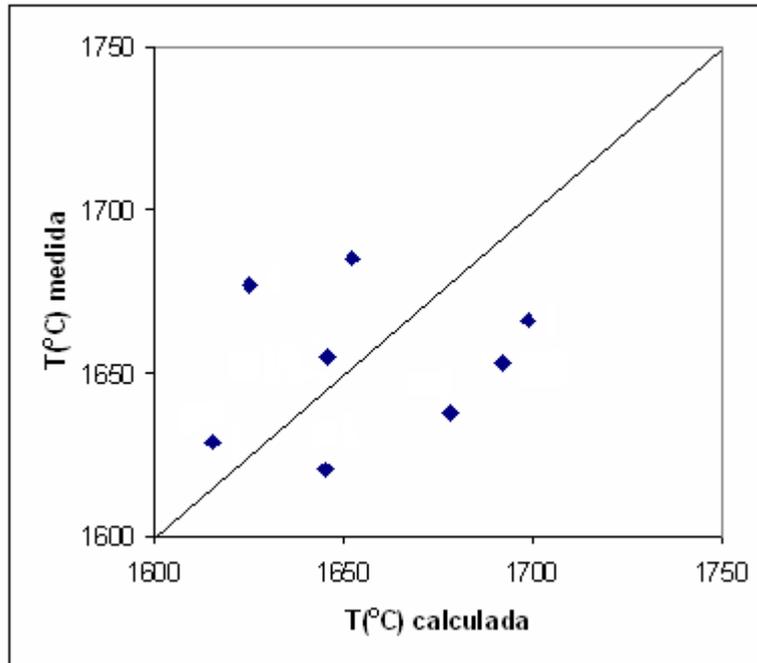


Figura 5 – Comparação entre as temperaturas calculadas e as medidas no fim de sopro.

4 CONCLUSÕES

Os resultados indicam que um modelo simples de balanço de massa e térmico para a previsão dos teores de fósforo e manganês no fim de sopro terá aplicação limitada, em vista da sua capacidade limitada de acerto. As dificuldades do uso deste modelo decorrem principalmente de:

- 1 – Incertezas nos pesos da escória e metal produzidos;
- 2 – Incertezas quanto à composição e temperatura média do gás;
- 3 – Oscilações operacionais do processo.

O nível de acerto do modelo para o percentual de manganês no fim de sopro mostrou-se baixo. As principais causas deste resultado são: a) a dificuldade de estimar a temperatura de fim de sopro, variável de grande influência sobre a fórmula empírica de partição do manganês. b) a equação empírica de partição de o manganês possuir um coeficiente de correlação a 0,65.

As previsões feitas pelo modelo para o fósforo de fim de sopro apresentaram um índice de acerto baixo, com maiores desvios de temperatura para as corridas. O modelo apresentou dificuldades para prever com boa precisão o fósforo de fim de sopro, obtendo um baixo coeficiente de correlação. Assim como para o manganês, a previsão do fósforo depende fortemente da temperatura. A precisão no cálculo da temperatura de fim de sopro influencia, portanto, a previsão de fósforo de fim de sopro.

A partição do fósforo, $L_P = f(\%CaO, \%MgO, \%MnO, \%FeO, \%P_2O_5, 1/T)$ e a partição do manganês, $L_{Mn} = f(\%CaO, \%MgO, \%FeO, \%P_2O_5, \%SiO_2, 1/T)$, são obtidas em função da temperatura no fim de sopro e da composição da escória, portanto deveria ser possível desenvolver melhores estimativas para o fósforo e manganês no fim de sopro, através das estimativas de composição da escória e temperatura no fim de sopro mais precisas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/UFF por incentivar e fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico nacional.

REFERÊNCIAS

- 1 FURTADO, A. F. (2000), “Formulação e Avaliação de Modelos para a Previsão de Manganês e Fósforo de Fim de Sopro em Conversor de Sopro Combinado”, Volta Redonda, Dissertação de Mestrado, EEIMVR/UFF, p.27-40.
- 2 TURKDOGAN, E. (1996), “Fundamentals of Steelmaking: The Institute of Materials”, p.231-236.
- 3 ALMEIDA, A. L., Avaliação dos Critérios para Cálculo da adição de Cal em Modelo Estático de Conversor LD-KGC. Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1998.
- 4 CORTES, E. (1999), Comunicação Particular.
- 5 SUITO, H.; INOUE, R. (1984), “Phosphorus Distribution between MgO-Saturated Cao-FetO-SiO₂-P₂O₅-MnO Slags and Liquid Iron”, Transaction ISIJ, 24, p. 40-46.
- 6 SUITO, H.; INOUE, R. (1995), “Thermodynamic Assessment of Manganese Distribution in Hot Metal and Steel”, Transaction ISIJ, 35, p. 266-271.