



EFEITO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS OPERACIONAIS E DE PROJETO NA PÓS-COMBUSTÃO E NA TEMPERATURA DOS FUMOS NO FORNO EOF¹

Levy Geraldo de Sousa²

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise, a partir de conceitos termodinâmicos, sobre como a variação de parâmetros operacionais e de projeto podem interferir na pós-combustão e na temperatura dos fumos para pré-aquecimento da sucata no forno EOF. A partir de parâmetros conhecidos e parâmetros de projeto, verificaram-se quais seriam as implicações do aumento e redução das aberturas de ar falso e vazão de oxigênio para pós-combustão. Verificou-se que a pós-combustão aumenta com o aumento das entradas de ar falso, e que a temperatura diminui com o aumento das mesmas devido à presença de nitrogênio e oxigênio não reagidos. Verificou-se que a pós-combustão e a temperatura aumentam com o aumento da vazão de oxigênio nos injetores atmosféricos. Conclui-se que o aumento no diâmetro do furo de carregamento de gusa torna-se uma modificação viável no projeto atual do EOF, visando à redução no tempo de carregamento de gusa líquido e o aumento na pós-combustão, tendo como consequência uma redução não expressiva na temperatura dos fumos. Algumas medições e análises da temperatura dos fumos serão realizadas na nova unidade que se encontra em instalação na Síria e com os novos dados coletados será possível validar ou ajustar o modelo proposto.

Palavras-chave: Processo EOF; Pós-combustão; Termodinâmica.

EFFECT OF THE VARIATION OF OPERATIONAL AND DESIGN PARAMETERS ON THE POST-COMBUSTION RATE AND FLUE GAS TEMPERATURE IN THE EOF

Abstract

The objective of this paper is to present an analysis on how the variations of design and operating parameters of the EOF may affect the post-combustion rate and the flue gas temperature for scrap preheating, by using thermodynamic concepts. After assuming some known operating and design parameters, the implications on the post-combustion rate of variations in the size of false air inlets (slag door and hot metal spout) and in the rate of oxygen injection through the atmospheric injectors have been verified. It has been found that post-combustion increases with the increase of false air admission, while flue gas temperature decreases, due to the presence of nitrogen and non-reacted oxygen. An increase of injected oxygen, in turn, results in an increase in both, post-combustion rate and temperature. This leads to the conclusion that an increase in the hot metal charging spout, aiming at a reduction of the hot metal charging time and at an increase in the post-combustion rate, is a viable modification in the EOF design, with the consequence of a reasonable reduction in the flue gas temperature. At the new EOF unit presently being installed in Syria some measurements and readings of the flue gas temperature will be carried out, which will help to validate or to adjust the proposed model.

Key words: EOF Process, Post-combustion, Thermodynamic.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico da Minitec Minitecnologias LTDA.



1 INTRODUÇÃO

1.1 O Processo EOF

O processo *EOF Energy Optimizing Furnace* foi desenvolvido no Brasil, na década de 80. Hoje se encontram unidades em operação no Brasil e na Índia. Trata-se de um processo de produção de aço a oxigênio, com algumas características específicas que lhe conferem eficiência, baixo custo operacional e produtividade extraordinária, ensejando médias anuais superiores a 36 corridas por dia calendário. Essas características permitem ao EOF a operação com até 40% de carga fria.⁽¹⁾ Desde então esta tecnologia vem sendo aperfeiçoada pela engenharia brasileira, e mais uma nova unidade encontra-se em construção na Síria.

1.2 A Pós-combustão no EOF

A pós-combustão ocorre pela injeção de uma quantidade adicional de oxigênio, no espaço acima do banho metálico, através dos injetores atmosféricos, dispostos estrategicamente no forno e também pelo entranhamento de ar falso na atmosfera do forno.

O aumento da proporção de sucata na carga, e, portanto, da produção de aço por tonelada de gusa líquido, exige a utilização de fontes energéticas adicionais. O pré-aquecimento da sucata e a adição de combustíveis auxiliares são as tradicionais. A oxidação do CO para CO₂ aumenta substancialmente a geração de calor por reações químicas.⁽²⁾

Desde a concepção original do EOF nos anos 80, foi aplicada a técnica de pós-combustão, mais recentemente foi desenvolvida nos processos tradicionais de sopro.

A perda de energia química pode ser reduzida elevando-se a proporção de CO₂ nos gases, através do aumento da pós-combustão, tornando mais eficiente o aproveitamento térmico do carbono.⁽²⁾

Na zona de pós-combustão o equilíbrio é baseado na reação abaixo:⁽²⁾



A energia liberada pela reação acima é da ordem de 6,25 kWh/Nm³ O₂.⁽³⁾

O grau de pós-combustão "PCD" pode ser definido pela seguinte reação.⁽³⁾

$$\text{PCD} = 100 * \frac{\% \text{CO}_2}{(\% \text{CO}_2 + \% \text{CO})} \quad \text{eq. 2}$$

A temperatura dos gases pode ser calculada a partir do equilíbrio termodinâmico O₂ – CO – CO₂.⁽²⁾

$$T (K) = \frac{33790}{\ln \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}} * P_{\text{O}_2}^{0,5}} + 10,25} \quad \text{eq. 3}$$

Entretanto o aumento da pós-combustão proveniente do ar falso que entra no forno resulta também na redução da temperatura dos fumos devido à grande quantidade



de nitrogênio presente no ar. Esta redução da temperatura dos fumos também é causada em menor escala pelo oxigênio que não reage.

Isto equivale a dizer que em reações exotérmicas, a redução na temperatura favorece a formação de produtos.⁽⁴⁾

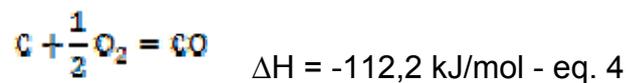
O presente trabalho apresenta como a pós-combustão e a temperatura dos fumos variam de acordo com alterações das condições que permitem a entrada de ar falso e com a variação do volume de oxigênio injetado para pós-combustão no forno EOF. Utilizaram-se conceitos termodinâmicos, parâmetros conhecidos e parâmetros de projeto.

2 METODOLOGIA

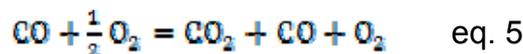
2.1 Divisão Teórica das Regiões do Forno para Análise

Para facilitar os cálculos dividiu-se o forno em três partes teóricas, que consistem em:

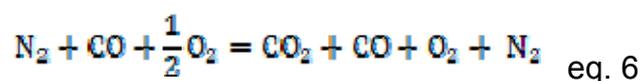
- Parte 1 – Região onde ocorre a descarburização do gusa líquido e formação do CO (seio do banho). Nesta região admitiu-se apenas o número de mols de O₂ estequiométrico. Determinou-se o número de mols de CO formados, de acordo com a equação abaixo (eq. 4). Utilizou-se este número de mols na pós-combustão das partes 2 e 3 do modelo proposto.



- Parte 2 – Região onde ocorre a primeira etapa de pós-combustão a partir do O₂ injetado. Nesta região admitiu-se o volume de O₂ injetado apenas para pós-combustão no forno, conforme parâmetros operacionais já conhecidos. Admitiu-se uma eficiência de 70%, ou seja, o número de mols de O₂ e CO no lado direito da equação 5 referem-se aos mols não reagidos.



- Parte 3 – Região onde ocorre a segunda etapa de pós-combustão a partir do ar falso. Nesta região admitiu-se que o número de mols de O₂ presente no ar reage com uma relação de queima de 70%, de acordo com a reação:



As partes mencionadas estão ilustradas na Figura 1.

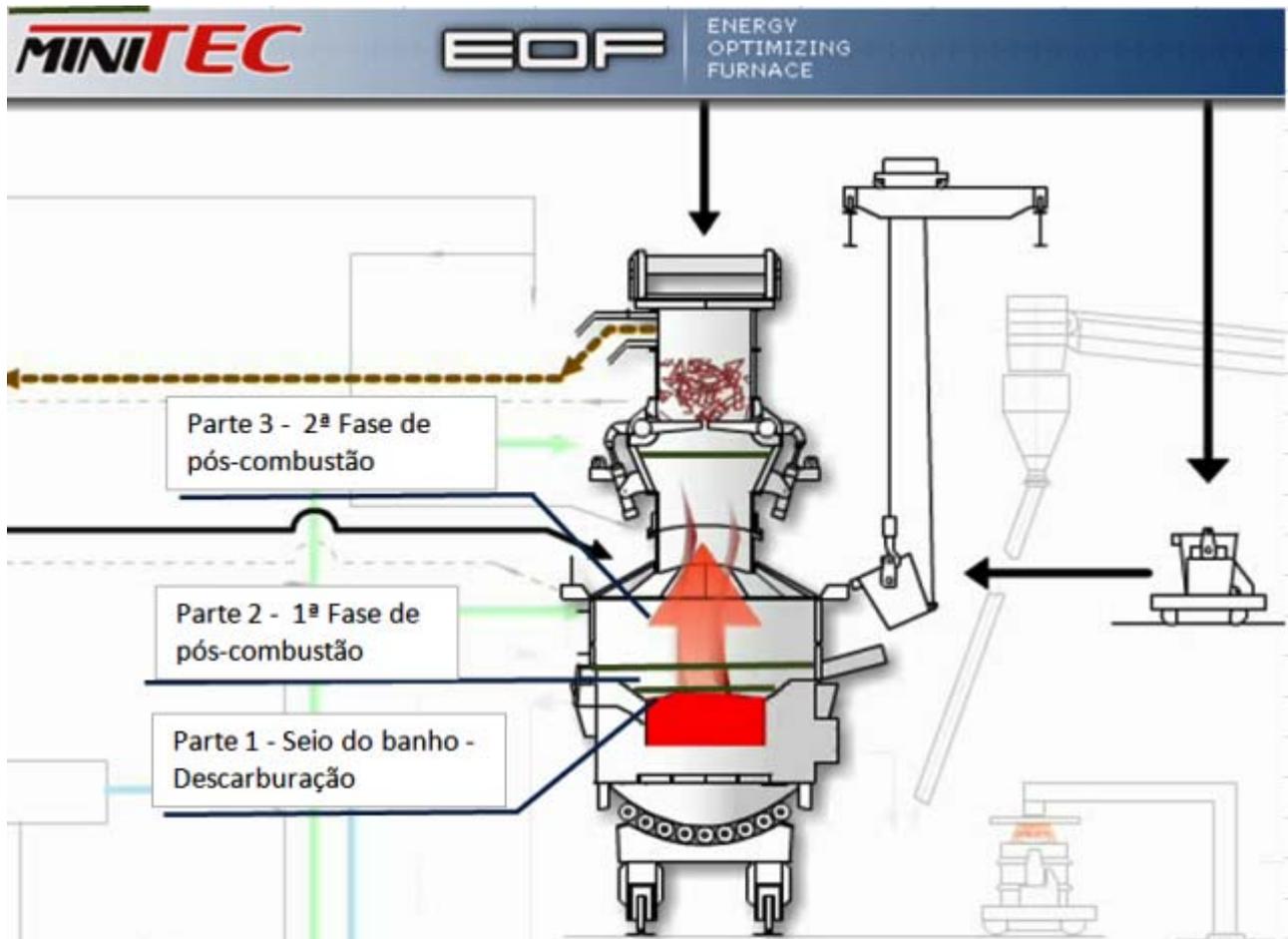


Figura 1. Regiões teóricas admitidas para análise das reações químicas.

2.2 As Premissas consideradas

- Forno com 35 toneladas de gusa líquido, com 4% de carbono a ser oxidado.
- Tempo de sopro de 20 minutos.
- A vazão de oxigênio através dos injetores atmosféricos é da ordem de 1.000 Nm³/corrida para o forno considerado, porém sabe-se que parte deste volume é usado na descarburação devido à agitação do banho, proveniente da injeção de O₂ pelas ventaneiras. Considera-se no modelo proposto que 50% deste volume são usados na pós-combustão.
- O oxigênio injetado, somado com o que entra pelas aberturas do forno, além do estequiométrico, realiza a pós-combustão com uma eficiência de 70% e o equilíbrio O₂ – CO – CO₂ é atingido.
- Velocidade de 5 m/s nas entradas de ar falso, sendo a mesma constante durante o sopro.
- A temperatura dos fumos calculada refere-se apenas à reação de pós-combustão.
- A temperatura final dos fumos, representa uma média ponderada entre as temperaturas obtidas nas equações de pós-combustão das partes 2 e 3 do forno, considera-se também os mols de oxigênio e nitrogênio não reagidos.
- Não se considera a oxidação dos outros elementos presentes no forno.



- Considera-se, conforme dados de projeto, a abertura inicial do furo de carregamento de gusa com 0,25 m de diâmetro.
- Conforme dados de projeto a largura da porta de escória é fixa com 1,0 m. A abertura da porta de escória pode ser alterada durante a corrida e esta pode ser deslocada com um curso máximo de 0,85 m.

3 RESULTADOS

3.1 Número de Mols de CO Formados na Primeira Parte do Forno

Como no seio do banho foi considerada apenas a descarburização do gusa líquido com a formação de CO, obteve-se a formação de 116.667 mols de CO para as premissas consideradas no item 2.2, sendo este número de mols estequiométrico, este é utilizado na pós-combustão das partes 2 e 3 do modelo proposto.

3.2 Variação da Temperatura e do Grau de Pós-combustão Influenciados pela Abertura da Porta de Escória

Conforme mencionado no item 2.2, a abertura da porta de escória pode ser alterada várias vezes durante toda a corrida, porém considerou-se a abertura inicial 0,5 m. Verificou-se quais seriam as variações do grau de pós-combustão e na temperatura dos fumos considerando a redução e o aumento desta mesma abertura. A Tabela 1 apresenta os resultados.

Tabela 1. Variação do grau de pós-combustão "PCD" e da temperatura dos fumos de acordo com a variação da abertura da porta de escória no forno EOF

Abertura da porta de escória (m)	PCD (%)	Temp. fumos (°C)
0,4	66,2	1575
0,5	71,5	1503
0,6	76,8	1442

Os mesmos resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 2 e 3.

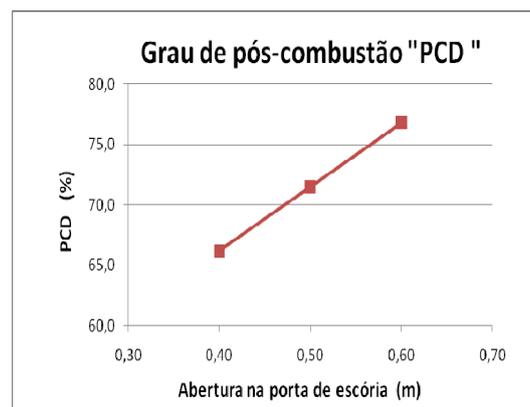


Figura 2. Variação da pós-combustão de acordo com a abertura da porta de escória.

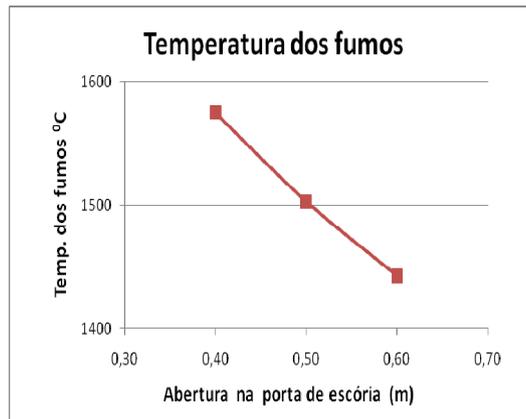


Figura 3. Variação da temperatura dos fumos de acordo com a abertura da porta de escória.

3.3 Variação da Temperatura e do Grau de Pós-combustão Influenciados pelo Diâmetro do Furo de Carregamento de Gusa

Conforme mencionado no item 2.2, o diâmetro do furo de carregamento de gusa é definido durante a fase de projeto, este inicialmente é dimensionado com 0,25 m de diâmetro. Verificou-se quais seriam as variações do grau de pós-combustão e na temperatura dos fumos considerando o aumento do mesmo. A Tabela 3 apresenta os resultados.

Tabela 3. Variação do grau de pós-combustão "PCD" e da temperatura dos fumos de acordo com a variação do diâmetro do furo de gusa no forno EOF

Diâmetro do furo de carregamento de gusa (m)	PCD (%)	Temp. fumos (°C)
0,25	71,5	1503
0,45	77,3	1437
0,60	83,9	1375

Os mesmos resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 4 e 5.

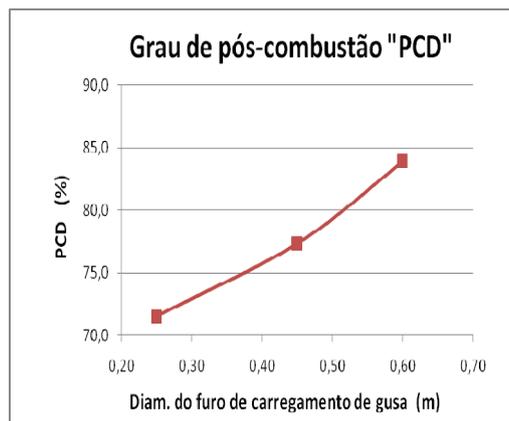


Figura 4. Variação da pós-combustão de acordo com o diâmetro do furo de carregamento de gusa.

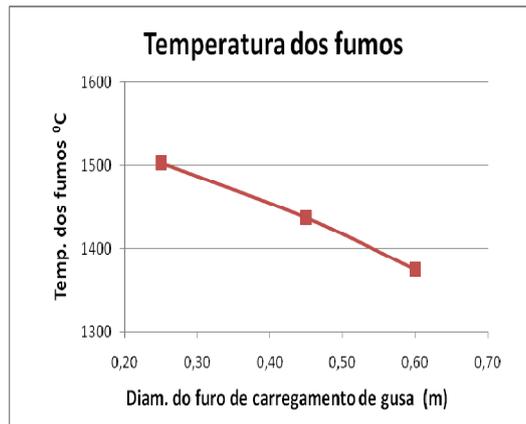


Figura 5. Variação da temperatura dos fumos de acordo com o diâmetro do furo de carregamento de gusa.

3.4 Variação da Temperatura e do Grau de Pós-combustão Influenciados pela Vazão de Oxigênio Injetado para Pós-combustão

Conforme mencionado no item 2.2, a vazão de oxigênio através dos injetores atmosféricos pode ser alterada durante o sopro, adotou-se a vazão inicial de 500 Nm³/corrida. Verificou-se quais seriam as variações do grau de pós-combustão e na temperatura dos fumos considerando o aumento e redução da mesma. A Tabela 4 apresenta os resultados.

Tabela 4. Variação do grau de pós-combustão e da temperatura dos fumos de acordo com a variação da vazão de O₂ injetado para pós-combustão no forno EOF

Vazão de O ₂ p/ pós-comb. (Nm ³ /cor.)	PCD (%)	Temp. fumos (°C)
400	65,8	1483
500	71,5	1503
600	76,7	1521

Os mesmos resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 6 e 7.

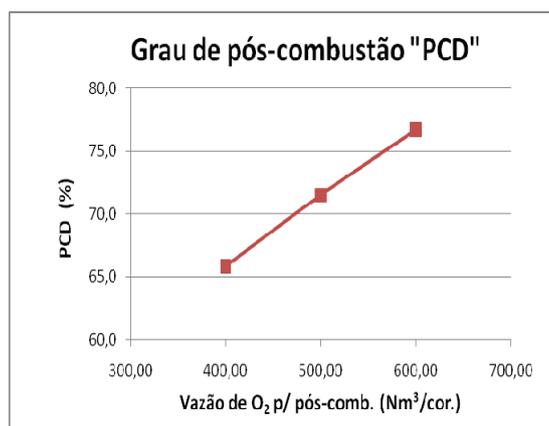


Figura 6. Variação da pós-combustão de acordo com a variação da vazão de O₂.

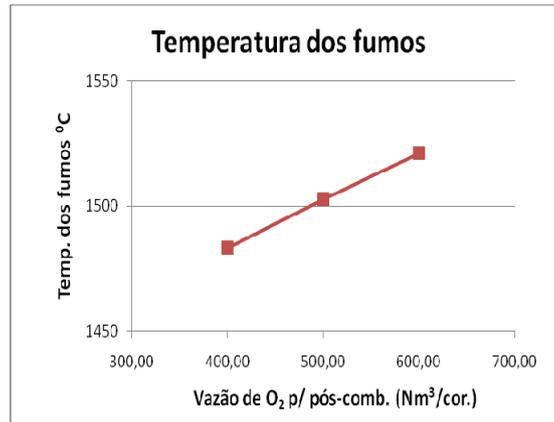


Figura 7. Variação da temperatura dos fumos de acordo com a variação da vazão de O₂.

3.5 Variação da Temperatura e do Grau de Pós-combustão Influenciados pela Abertura da Porta de Escória e pela Vazão de O₂ para Pós-combustão

Com os resultados obtidos até este ponto, foi decidido aumentar o diâmetro do furo de carregamento de gusa para o projeto do próximo EOF que está sendo instalado na Síria para 0,45 m. Este diâmetro é fixo durante a campanha.

A Tabela 5 mostra algumas condições operacionais que podem ser seguidas, com resultados do grau de pós-combustão e temperatura dos fumos, considerando a modificação no diâmetro do furo de carregamento de gusa mencionada acima.

Tabela 5. Variação do grau de pós-combustão e da temperatura dos fumos de acordo com a variação da vazão de O₂ injetado para pós-combustão e abertura da porta de escória no forno EOF

	Abertura da porta de escória (m)					
	0,4		0,5		0,6	
Vazão de O ₂ Nm ³ /corrida	Temp. (°C)	PCD (%)	Temp. (°C)	PCD (%)	Temp. (°C)	PCD (%)
400	1477	66	1420	72	1371	77
500	1496	72	1437	77	1386	83
600	1514	77	1453	82	1401	87

4 DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos, com as devidas considerações feitas, pode-se comprovar que o grau de pós-combustão no forno EOF é superior ao EAF e BOF.⁽¹⁾ Nas tabelas e figuras da porta de escória e do furo de gusa, o aumento da pós-combustão resulta na redução da temperatura dos fumos, quando deveria aumentar pela energia da reação de pós-combustão. Isto se deve ao fato da entrada de 79% de Nitrogênio do ar a temperatura ambiente, mas também significa uma economia de 21% de oxigênio que viria de fontes mais caras.

Sabe-se que as reações ocorrem simultaneamente nas regiões do forno, e que as mesmas ocorrem com uma intensidade muito maior no início do sopro após a oxidação de outros elementos preferenciais ao carbono. Considera-se no presente trabalho as reações que ocorrem durante toda a corrida, sem considerar a taxa instantânea das mesmas.

Com os devidos ajustes no modelo proposto a partir de dados operacionais espera-se automatizar a cada instante a abertura da porta de escória, a vazão de O₂ pelos injetores e a potência entregue ao exaustor dos fumos durante o sopro, objetivando-



se manter a temperatura dos fumos na região de pré-aquecimento da sucata de acordo com o requerido.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o aumento no diâmetro do furo de carregamento de gusa torna-se uma modificação viável no projeto atual do EOF, pois essa dimensão é fixa durante a campanha e este aumento reduz o tempo de carregamento de gusa líquido com uma redução não expressiva na temperatura dos fumos (Tabela 3).

Qualquer outro ajuste que se faça necessário durante a operação pode ser feito com o controle da vazão de oxigênio injetado, com a abertura ou fechamento da porta de escória (Ex. tabela 5), e/ou com o aumento ou redução da pressão negativa no interior do forno, ajustada pela potência entregue ao exaustor, (implícito nos cálculos), resultando na variação na velocidade de entrada de ar falso.

Conclui-se que a temperatura dos fumos na região do pré-aquecedor de sucata é o principal parâmetro a ser acompanhado durante o sopro. Quando o aumento da temperatura for requerido, deve-se reduzir a abertura da porta de escória, aumentar a vazão de oxigênio para favorecer a pós-combustão e a liberação de energia sem perdas térmicas devido à presença do nitrogênio contido no ar falso, e reduzir a potência entregue ao exaustor de fumos, ou vice-versa.

Agradecimentos

A Minitec Minitecnologias LTDA pelos dados fornecidos.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHERER, S.W.G., PFEIFER, H.C., COLOMBO SOUZA, L.R. – O processo EOF – Eficiente e versátil. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA INTERNACIONAL DA ABM, 38. 2007, Belo Horizonte. Minas Gerais: ABM, 2007. P 650.
- 2 CAMPOS, E.B., Modelo matemático da pós-combustão em convertedores LD. Dissertação de Mestrado. UFMG. 1992. P 17-54.
- 3 CHEVRAND, L.J.S., HOPPERDIZEL, P. Curso de aciaria elétrica – Programa de educação continuada da ABM, 2010. P 92.
- 4 Castro, L.F.A., Sampaio, R.S., Tavares, R.P. Termodinâmica metalúrgica – Texto preparado pelos professores da Escola de Engenharia da U.F.M.G. P 254.