



MODELO DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS PARA LAMINAÇÃO

EDUARDO SÉRGIO DA SILVA GONÇALVES¹, JOSÉ EDUARDO MAUTONE BARROS²

¹Gerência de Engenharia de Manutenção
ArcelorMittal Monlevade

Av. Getúlio Vargas, 100, Centro, João Monlevade -MG, 35930-900, Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, Brasil

(Recibido 18 de octubre de 2011, para publicación 24 de noviembre de 2011)

Resumo – Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático computacional capaz de simular o processo de aquecimento de tarugos de aço no interior de um forno de reaquecimento para laminação. A metodologia proposta simula o processo de combustão, calculando as energias de entrada, de saída e as perdas inerentes ao processo. O algoritmo computacional de simulação do forno permite ao usuário a reprodução do processo de combustão a partir das vazões medidas dos reagentes na entrada e de suas respectivas composições e, a partir de então, é calculada a composição dos produtos através de um modelo de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta, a uma equação de equilíbrio químico, para misturas ricas. A temperatura de desenformamento dos tarugos é calculada por meio da determinação do coeficiente de transferência de calor entre o ambiente do forno e os tarugos utilizando, para isso, o princípio da convecção forçada com escoamento turbulento sobre uma placa isotérmica. A energia do ar e do Gás de Alto Forno (GAF) recuperada após a passagem pelos recuperadores de calor é calculada através de modelos de regressão desenvolvidos empiricamente e os rendimentos de tais recuperadores são determinados pelo método da efetividade de NUT (Número de Unidades de Transferência). As perdas pela água de refrigeração e pelas paredes externas do forno são determinadas através de modelos simplificados e as outras perdas foram calculadas seguindo um modelo de regressão empírico no qual foram utilizados dados medidos no processo. Para solucionar a equação da conservação da energia no processo, foi adotado o método de busca de raízes de Newton-Raphson. A simulação permite calcular: o balanço térmico instantâneo do processo, a eficiência do forno e dos recuperadores de calor, a composição química da mistura dos reagentes e dos produtos da combustão; o excesso de ar utilizado na reação; a temperatura dos reagentes e dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor; de desenformamento dos tarugos, dentre outras variáveis importantes para o gerenciamento do processo. O modelo desenvolvido mostrou-se uma ferramenta eficiente para um gerenciamento mais refinado do processo em tempo real.

Palavras-chave – Balanço térmico, forno de reaquecimento, consumo de energia.

1. INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas vêm buscando cada vez mais maneiras de otimizar os seus processos para manterem-se competitivas no mercado. Estes esforços são direcionados quase sempre a três fatores básicos: redução de custo; aumento da segurança do processo e redução dos impactos ambientais.

O consumo de energia, o controle da atmosfera ideal para o aquecimento e a temperatura de saída dos tarugos em um forno de laminação estão diretamente ligados à qualidade dos produtos para o atendimento aos requisitos mínimos exigidos pelos clientes. Em contrapartida, a economia de energia está relacionada à competitividade da empresa, contribuindo fortemente no preço final dos produtos.

A economia de energia tem de ser feita seguindo critérios que favoreçam a máxima produtividade do processo, buscando o mínimo tempo de permanência dos tarugos dentro do forno e a melhor homogeneização da temperatura do material a ser laminado.

A atmosfera protetora é baseada principalmente no teor de oxigênio presente nos produtos da combustão no interior do forno. No caso estudado, existem procedimentos internos para o teor de oxigênio ideal para cada tipo de material processado a fim de se evitar problemas devido a reações de oxidação no material, geração de carepa e facilidade de sua remoção, descarbonetação (redução do teor de carbono na camada superior do aço), dentre outros.

A temperatura de saída dos tarugos tem influência direta em diversos aspectos no processo de laminação dos aços como: resistência do material à deformação; carga, torque e potência de laminação; velocidade de laminação; defeitos superficiais; microestrutura e propriedades físicas do material; acabamento do produto final, etc.

Com tantos fatores diferentes no processo de aquecimento de tarugos para laminação, o gerenciamento do maior número possível de variáveis torna-se determinante na qualidade do aquecimento e na tomada de decisões.

O foco deste trabalho está na aplicação de uma metodologia para a simulação em tempo real do processo de aquecimento de tarugos para laminação de uma linha de produção de fio máquina da ArcelorMittal Monlevade.

Assim, o objetivo final é obter um panorama do comportamento do forno com boa precisão e representabilidade, de forma a obter uma ferramenta de gerenciamento do processo. Como benefícios, além dos citados anteriormente, espera-se proporcionar uma maior rapidez na detecção de falhas em equipamentos do forno e um aumento da efetividade na solução dos problemas por parte dos operadores e técnicos no sentido de aumentar as ferramentas disponíveis e direcionar seus esforços em pontos de maior relevância.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do forno de rea aquecimento

O Forno do Trem de Laminação 1 (TL1) da ArcelorMittal Monlevade, objeto do presente trabalho e internamente chamado de Forno Davy é do tipo *Walking Hearth* (Soleiras Caminhantes) e é caracterizado pelo aquecimento através da superfície superior da carga, por meio de queimadores de chama longa montados em paredes frontais e distribuídos em quatro zonas de aquecimento. As dimensões internas (dimensões úteis) do forno são 33 m de comprimento e 13,1 m de largura. Sua carga completa é composta de 121 tarugos, espaçados em aproximadamente 100 mm uns dos outros. O esquema do Forno Davy pode ser observado na Fig. 1.

O forno é dividido em quatro zonas principais, sendo:

- Zona 1: zona de pré-aquecimento. Constituída de oito queimadores instalados na primeira parede frontal. Cobre a região de enformamento e possui as soleiras dentadas para melhor homogeneização da temperatura de pré-aquecimento.
- Zona 2: zona de aquecimento. Constituída de oito queimadores na segunda parede frontal e possui soleiras planas.
- Zona 3: zona de homogeneização esquerda, constituída de quatro queimadores instalados no lado esquerdo da parede frontal do desenformamento. Cobre a região da cabeça do tarugo.
- Zona 4: Zona de homogeneização direita, constituída de quatro queimadores instalados no lado direito da parede frontal do desenformamento. Cobre a região da cauda do tarugo.

A matriz energética do Forno Davy utiliza prioritariamente o GAF preaquecido por meio de um trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado Recuperador de Calor de GAF, localizado no canal de fumaça onde é recuperada parte da energia térmica que seria perdida nos fumos que saem do forno. O Gás Natural é utilizado quando da escassez de GAF e/ou como complementação energética em função do ritmo de operação do forno. Como comburente, é utilizado o ar atmosférico que, assim como no caso do GAF, é preaquecido por meio de outro trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado Recuperador de Calor de Ar. É utilizado também o oxigênio gasoso com pureza mínima de 95%, misturado e preaquecido junto ao ar de combustão. Para a segurança do processo, o uso de oxigênio é limitado de forma que o enriquecimento permaneça na faixa de 30% na composição final do ar de combustão.

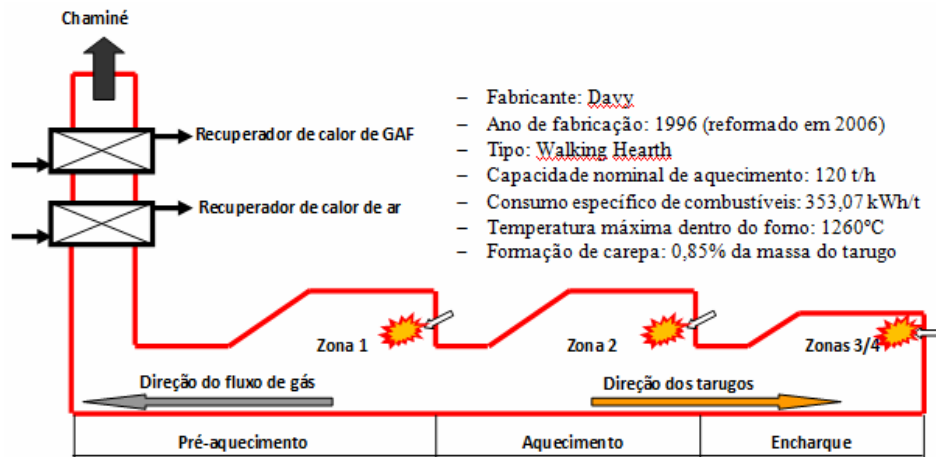


Fig. 1. Esquema do Forno de Reaquecimento de Tarugos do TL1.

O forno possui um sistema de controle de combustão denominado duplo limite cruzado. Este tipo de controle obedece ao ritmo de produção da laminação aumentando ou diminuindo as vazões de combustíveis e de ar de combustão automaticamente de acordo com a variação da temperatura e do teor de oxigênio na fumaça, medido através de um analisador *online* que analisa uma amostra em cada zona do forno. A relação ar/combustível é fixa e independente da variação da composição química dos combustíveis e do ar de combustão, o que pode levar ao desperdício de energia em função do excesso ou falta de ar.

2.2. Metodologia para cálculo do balanço térmico

Para a construção do programa de simulação, foi utilizado o Scilab 5.2.0 [1], software aberto disponível na internet. O sistema PIMS foi utilizado para coleta das variáveis de entrada para a realização dos cálculos e depois para o registro das variáveis de saída calculadas pelo modelo. O programa utiliza como variáveis de entrada as vazões de GAF, GN, ar de combustão e oxigênio. Utiliza também o valor da umidade absoluta do ar atmosférico, composição química do GAF, a vazão de tarugos (ritmo de operação do forno) e a temperatura da fumaça antes do recuperador de calor de ar. Todas estas variáveis são coletadas *online* utilizando-se um sistema interno de gerenciamento de variáveis denominado PIMS (*Plant Information Management System*). Como principais variáveis de saída, tem-se a temperatura média dos produtos da combustão no interior do forno, a temperatura após o recuperador de calor de ar e após o recuperador de calor de GAF. Também são calculadas as temperaturas do ar de combustão e do GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores de calor, rendimento do forno e dos recuperadores de calor, a composição química dos produtos da combustão, o excesso de ar, as energias recuperadas, absorvidas e perdidas no processo e a temperatura dos tarugos na saída do forno.

A vazão dos reagentes, bem como as temperaturas do forno são médias através de instrumentos apropriados para tal com planos de calibração controlados pela equipe de instrumentação da ArcelorMittal Monlevade e realizados por empresa especializada a fim de garantir a confiabilidade dos dados, já que trata-se de variáveis de suma importância para o processo.

A umidade absoluta do ar é medida instantaneamente através de um medidor *online* e passa por calibração realizada pela equipe de instrumentação da ArcelorMittal Monlevade.

O GAF, combustível “abundante” produzido na usina siderúrgica, tem prioridade de consumo e apresenta grande variabilidade em sua composição química. Para a medição do teor dos componentes do GAF, é utilizado um analisador de gás *online*. A umidade do GAF é calculada nas condições de entrada do recuperador de calor. O GN, por ser um combustível proveniente de fonte externa, é utilizado somente como complementação energética para alcance das temperaturas de *set point* do forno. A sua utilização é esporádica e, como dito anteriormente, requer alguns cuidados principalmente quando o consumo de oxigênio estiver alto. O GN não apresenta grandes variações na sua composição química que pode ser consi-

derada fixa conforme relatório técnico enviado pelo setor de operações da Companhia de Gás de Minas Gerais (GASMIG) [2]. A composição do ar de combustão na base seca é de aproximadamente 79% nitrogênio e 21% de oxigênio. De acordo com a vazão de oxigênio e de ar de combustão, bem como a informação da umidade absoluta do ar atmosférico, esta composição é recalculada na base úmida em tempo real.

A partir das composições químicas dos combustíveis e comburentes, são feitas as misturas dos gases, as reações de combustão e por fim o balanço térmico.

O balanço térmico nada mais é do que a quantificação de todas as entradas e saídas de calor de um forno, gerando a equação geral para o sistema:

$$\dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{GAF} + \dot{H}_{Reagentes(298,15K)} = \dot{H}_{Produtos} + \dot{Q}_{Tarugos} + \dot{Q}_{Refrigeração} + \dot{Q}_{Paredes} + \dot{Q}_{Carepa} \quad (1)$$

onde $\dot{Q}_{ar}$ e $\dot{Q}_{GAF}$ são os fluxos de calor absorvidos pelo ar e pelo GAF nos respectivos recuperadores de calor. $\dot{H}_{Reagentes(298,15K)}$ e $\dot{H}_{Produtos}$ são as entalpias dos reagentes a 298,15 K e dos produtos da combustão respectivamente. A entalpia de cada componente dos reagentes e dos produtos da combustão é calculada através do polinômio e respectivos coeficientes encontrados a partir das tabelas JANAF (Formato NASA-SP-273, 1993) [3]. $\dot{Q}_{Tarugos}$ representa o calor absorvido pelos tarugos no interior do forno. $\dot{Q}_{Refrigeração}$ é o calor perdido para a água de refrigeração e selagem, calculado através da diferença entre a entalpia da água nas temperaturas de saída e de entrada no forno, que foram fixadas em 32 e 28°C respectivamente a uma vazão fixa de 320 m³/h, $\dot{Q}_{Paredes}$ é o calor perdido pelas paredes considerando a temperatura das paredes externas do forno fixa em 150°C e a temperatura ambiente fixa em 25°C. $\dot{Q}_{Carepa}$ representa o calor liberado durante a formação de carepa no interior do forno, já que se trata de uma reação exotérmica [4] e foi calculado considerando a entalpia da carepa a 1100°C e volume fixo em 0,85% da massa dos tarugos conforme manual de operação do forno Davy. O modelo suporta cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas.

Para o cálculo de $\dot{H}_{Produtos}$ e $\dot{Q}_{Tarugos}$, é necessário calcular a temperatura dos produtos de combustão e para isto, após a obtenção de todas as outras variáveis, é realizado o balanço da equação (1), utilizando o método de busca de raízes de Newton Raphson.

Para o cálculo das temperaturas do ar e do GAF após os seus respectivos recuperadores de calor, foi preciso utilizar a temperatura da fumaça medida imediatamente antes do recuperador de calor de ar. Isto devido à existência de um longo trecho do canal de fumaça entre a saída do forno e a entrada do recuperador e também por haver eventualmente uma injeção de ar de diluição para a proteção do recuperador. Esta injeção é acionada automaticamente em função da temperatura da fumaça e tem a sua vazão aumentada proporcionalmente enquanto a temperatura continuar a subir. Em consequência disto, há uma redução na temperatura da fumaça um tanto quanto difícil de estimar e/ou calcular. O cálculo do calor recuperado pelo ar e pelo GAF é feito através da equação (2):

$$\dot{Q}_{Recuperador} = \dot{m}_{fumaça} \cdot \varepsilon \cdot c_{p(fumaça)} (T_{f(in)} - T_{ar/GAF(in)}) \quad (2)$$

onde $\dot{m}_{fumaça}$ é a vazão mássica dos produtos da combustão, $T_{f(in)}$ é a temperatura dos produtos da combustão antes de cada recuperador e $T_{ar/GAF(in)}$ representa a temperatura do ar e do GAF antes de passar pelos recuperadores, fixadas em 298,15 K. $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$ é a efetividade do recuperador multiplicada pelo calor específico à pressão constante do fluido de menor capacidade térmica [5], que neste trabalho será denominado calor específico médio do recuperador de calor e foi obtido empiricamente, um para cada recuperador, através das equações (3) e (4):

$$\dot{Q}_{fumaça} = \dot{m}_{fumaça} \cdot c_{p(fumaça)} (T_{f(in)} - T_{f(out)}) \quad (3)$$

$$\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)} = \frac{\dot{Q}_{fumaça}}{\dot{m}_{fumaça}(T_{f(in)} - T_{ar/GAF(in)})} \quad (4)$$

onde $\dot{Q}_{fumaça}$ representa o calor perdido pelos produtos da combustão ao passar pelos recuperadores, $T_{f(out)}$ é a temperatura dos produtos da combustão após a passagem pelo recuperador, o $c_{p(fumaça)}$ é o calor específico médio dos produtos da combustão, considerando sua temperatura média antes e após os recuperadores de calor. A partir da equação (4), foram encontrados vários valores para $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$ em diferentes condições operacionais do forno e desenvolvido um modelo de regressão conforme equação (5):

$$\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)} = a + b \cdot \dot{m}_{fumaça} + c \cdot \dot{m}_{ar/GAF} + d \cdot T_{f(in)} \quad (5)$$

onde a , b , c e d são coeficientes do modelo de regressão.

A partir da determinação do $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$, foi possível calcular a variável desconhecida, $T_{f(in)}$ da equação (2), uma vez que a variável $\dot{Q}_{Recuperador} = \dot{Q}_{fumaça}$.

Para o cálculo da temperatura do ar de combustão e do GAF após o aquecimento nos recuperadores, foi verificado que o calor absorvido pelo ar e pelo GAF tinha valores diferentes em relação ao calor perdido pelos produtos da combustão ao passar por ambos recuperadores, sendo assim, da mesma forma que para o cálculo do $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$, foram encontrados empiricamente vários valores para o calor absorvido pelo ar e pelo GAF a partir da equação (6):

$$\dot{Q}_{ar/GAF} = \dot{m}_{ar/GAF} \cdot c_{p(ar/GAF)}(T_{ar/GAF(out)} - T_{ar/GAF(in)}) \quad (6)$$

Com base em um amplo banco de dados, foi possível estabelecer um modelo de regressão para o cálculo da perda de calor de cada recuperador, ou seja, a diferença entre o calor perdido pelos produtos da combustão e o calor absorvido pelo ar e pelo GAF conforme equação (7) e com isso calcular a temperatura de saída do ar e do GAF pela equação (8).

$$\dot{Q}_{loss} = a_1 + a_2 \cdot \dot{m}_{fumaça} + a_3 \cdot \dot{m}_{ar/GAF} + a_4 \cdot T_{f(in)} \quad (7)$$

$$T_{ar/GAF(out)} = \frac{\dot{Q}_{Recuperador} - \dot{Q}_{loss}}{\dot{m}_{ar/GAF} \cdot c_{p(ar/GAF)}} + T_{ar/GAF(in)} \quad (8)$$

A efetividade dos recuperadores de calor foi calculada segundo o método da efetividade de NUT (Número de Unidades de Transferência) [6].

O cálculo da transferência de calor entre o forno e os tarugos segue uma equação desenvolvida para o forno em estudo:

$$\dot{Q}_{forno} = \dot{m}_{Tarugos} \cdot h_x(T_{forno} - T_{Tarugos(in)}) \quad (9)$$

onde h_x representa o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o gás de combustão nas zonas e o tarugo e foi determinado empiricamente utilizando o princípio da convecção forçada com escoamento turbulento sobre uma placa isotérmica [7]. Com isto, é possível calcular a temperatura de saída dos tarugos através da equação (10):

$$T_{Tarugos(out)} = \frac{\dot{Q}_{forno}}{\dot{m}_{tarugos} \cdot c_{p(Tarugos)}} + T_{Tarugos(in)} \quad (10)$$

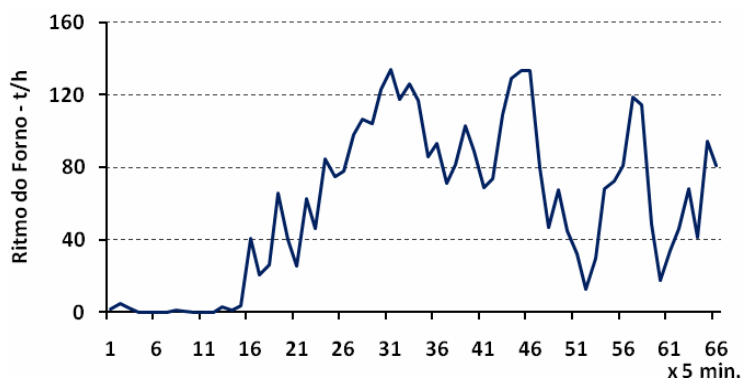


Fig. 2. Variação do ritmo de produção do forno.

Outro modelo empírico foi desenvolvido a fim de calcular as outras perdas envolvidas no processo que se devem principalmente em função de fatores como a saída de gases pelas aberturas existentes no forno e entrada de ar externo pela porta de enforamento que, embora a pressão interna do forno seja positiva, ocorre em virtude de a porta estar localizada próximo à saída de gases, provocando uma depressão nesta região. Tais perdas são difíceis de mensurar e o cálculo deve ser objeto de um estudo amplo e complexo e foram calculadas através da equação geral do sistema, a partir da diferença entre todas as entradas e saídas de energia, utilizando dados reais medidos pelos instrumentos existentes no forno.

O ajuste da dinâmica do forno também foi necessário para compensar os atrasos entre as temperaturas medidas pelos instrumentos e calculadas pelo modelo, desta forma foi considerada a energia absorvida pelos tarugos armazenados no interior do forno, ao invés de considerar apenas a energia absorvida em função de operação. A mesma analogia foi feita para os produtos da combustão que se encontram no interior do forno, pois sempre que havia qualquer variação nas vazões de reagentes na entrada, o modelo interpretava que o volume de fumos no interior do forno também variava instantaneamente.

Com todas as variáveis envolvidas calculadas, foi possível reescrever a equação geral para o sistema:

$$\dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{GAF} + \dot{H}_{Re\ agentes\ (298,15K)} = \dot{H}_{Pr\ odutos} + \dot{H}_{Pr\ odutos\ (Acum.)} + \dot{Q}_{Tarugos} + \dot{Q}_{Tarugos\ (Acum.)} + \dot{Q}_{Perdas} + \dot{Q}_{Carepa} \quad (11)$$

Onde $\dot{Q}_{Tarugos\ (Acum.)}$ e $\dot{H}_{Pr\ odutos\ (Acum.)}$ representam a energia absorvida pelos tarugos armazenados no interior do forno e a energia disponível nos produtos da combustão armazenados no interior do forno para ajuste da dinâmica do modelo.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Para a apresentação dos resultados, o programa foi executado em tempo real e foram selecionados dados de operação do forno em regime transiente de forma a mostrar o comportamento dinâmico do modelo. Desta maneira, foram analisadas as condições operacionais com variações significativas do ritmo de produção do forno e das vazões de reagentes. Foi considerado um tempo de operação de 5 horas e 30 minutos como sendo suficiente para mostrar a resposta do modelo frente às diferentes condições operacionais. A coleta de dados para o processamento do programa é feita uma vez a cada segundo e os valores são agrupados calculando-se a média a cada 5 minutos através do PIMS antes de serem processados, gerando um total de 66 dados. Os gráficos das Fig. 2 a 3 mostram a variação da condição operacional do forno durante o período da análise.

Observa-se no gráfico da Fig. 2 que o ritmo de produção variou desde o momento em que o forno estava sem produzir (parado), até atingir momentos de produção máxima, chegando a ultrapassar a capacidade nominal do forno (120 t/h). Apesar de não estar produzindo, o forno ainda precisa continuar a consumir energia para a manutenção da sua temperatura interna, como pode ser visto no próximo gráfico.

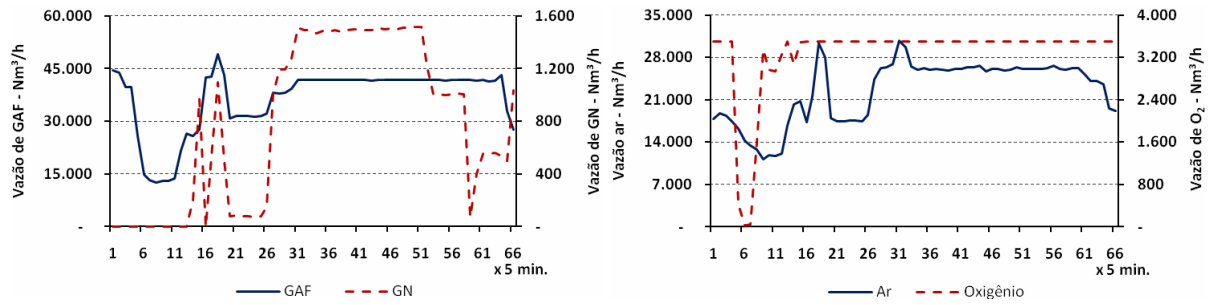


Fig. 3. (a) Variação do consumo de combustíveis e (b) Variação do consumo de comburentes.

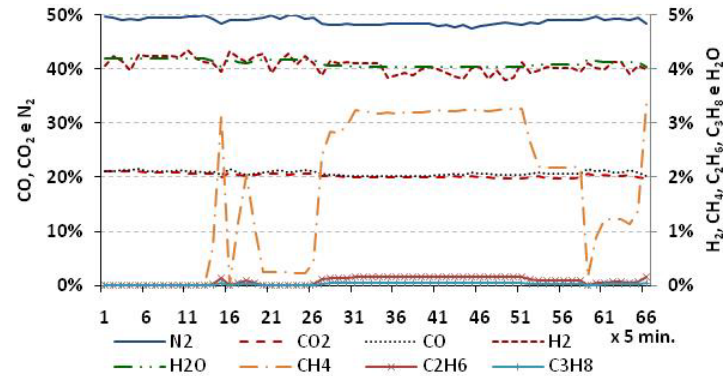


Fig. 4. Variação da composição química do GAF na base seca.

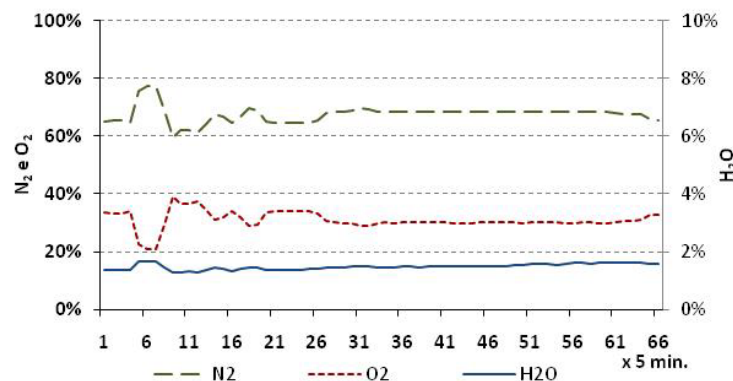


Fig. 5. Variação da composição química do ar enriquecido na base úmida.

No gráfico da Fig. 3 (a), destaca-se o instante em que se iniciou o aquecimento do forno para começar a produzir (ponto 11 do gráfico) devido ao aumento da vazão de combustíveis. A partir do ponto 31, em que a produção atingiu valores muito altos, o consumo de combustíveis também era alto, voltando a ter o seu valor reduzido junto com o ritmo de produção. Na Fig. 3(b), destaca-se o momento do ajuste da vazão de ar e de oxigênio em função da variação da vazão de combustíveis (pontos 1 a 31).

A variação da composição química da mistura dos combustíveis (GN+GAF) é mostrada no gráfico da Fig. 4.

Observa-se no gráfico acima a variação do teor de CH₄ semelhante ao perfil da curva de vazão de GN mostrada no gráfico da Fig. 3(a). A presença de C₂H₆ e de C₃H₈ é quase nula (apenas traços) devido ao volume muito maior de GAF do que de GN.

A composição química do ar enriquecido mostrada no gráfico da Fig. 5 é calculada pelo programa considerando as vazões de ar e oxigênio, bem como a umidade absoluta do ar atmosférico.

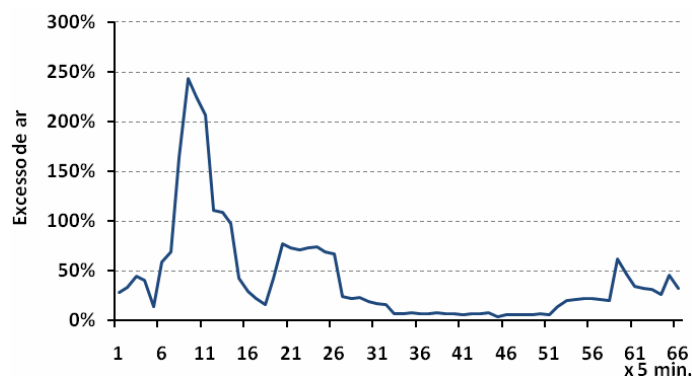


Fig. 6. Variação do excesso de ar.

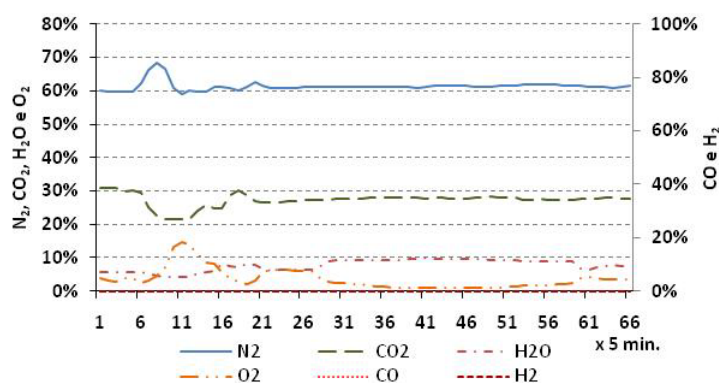


Fig. 7. Variação da composição química dos produtos da combustão.

O excesso de ar praticado em tempo real é calculado de acordo com as vazões e composições dos combustíveis e do ar enriquecido e pode ser observado no gráfico da Fig. 6.

Observa-se no gráfico acima que, principalmente entre os pontos 1 a 31, em que houve uma grande variação das vazões de reagentes, o excesso de ar sofreu também grandes variações devido às tentativas de ajuste pelo sistema de controle de combustão do forno. Ressalta-se que este ajuste levou um tempo de aproximadamente três horas para ser feito até que se atingisse uma condição estável de operação, já que este valor deve permanecer na faixa entre 5 e 15%. A partir do ponto 51 houve nova variação em função, principalmente, da queda súbita da vazão de GN.

Como dito anteriormente, o modelo suporta cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas. Após as reações de combustão, a composição química dos produtos pode ser observada no gráfico da Fig. 7.

No gráfico acima, destaca-se uma variação dos níveis de N₂, de O₂ e de H₂O em função do grande excesso de ar aliado à grande redução da vazão de oxigênio para enriquecimento do ar de combustão. A variação da concentração de CO₂ se deve em função da redução da vazão de GAF, que possui a maior concentração deste gás. Além disto, também devido à redução de combustíveis, houve a redução da formação de CO₂ nas reações de combustão.

Ainda no gráfico acima, destaca-se também a ausência de CO e de H₂ nos produtos da combustão em consonância com o excesso de ar mostrado no gráfico da Fig. 7. Não foram considerados os teores de NO_x e outros componentes formados a fim de simplificar os cálculos do modelo.

O gráfico das Fig. 8 (a) e (b) mostram as entradas e saídas de energia calculadas pelo programa.

A energia de entrada dos reagentes é calculada a 298,15 K. Destaca-se a semelhança entre o perfil das curvas das energias dos reagentes, recuperada pelo ar e pelo GAF. Este perfil é semelhante ao perfil das curvas de vazão de entrada dos combustíveis. A energia liberada pela formação de carepa é função do ritmo de produção e segue o mesmo perfil do gráfico da Fig. 2.

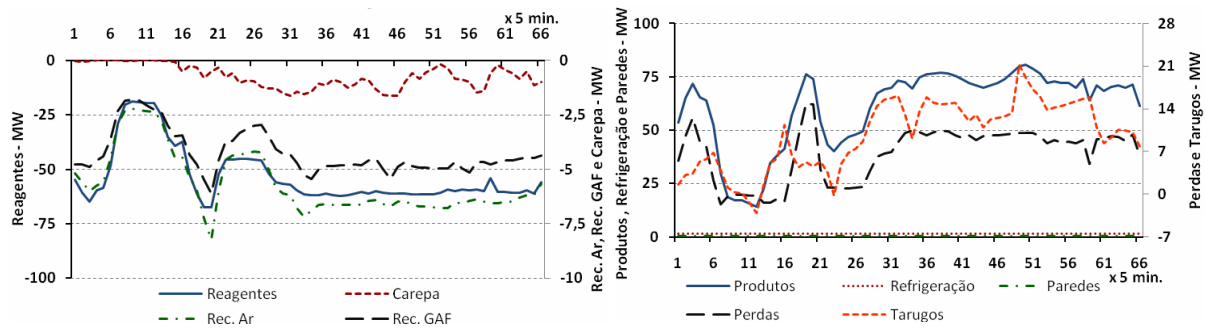


Fig. 8. (a) Variação das entradas de energia e (b) Variação das saídas de energia.

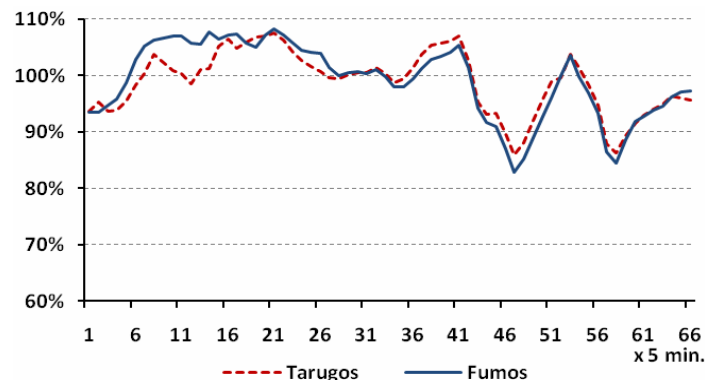


Fig. 9. Variação das temperaturas de saída dos tarugos e média do forno.

Na Fig. 8(b), destaca-se que em alguns momentos que a energia absorvida pelos tarugos teve o seu valor negativo, indicando que os tarugos “cederam” energia ao forno em virtude do baixo ritmo de produção e da baixa vazão de reagentes.

A temperatura média dos produtos da combustão representa a temperatura ambiente média do forno, ou seja, considerando as quatro zonas. Para mostrar este resultado na forma de gráfico, foi feita uma relação entre os valores calculados e a média obtida de todos os termopares das zonas do forno. Os valores absolutos não são mostrados para preservar informações de processo da ArcelorMittal Monlevade. De maneira análoga foi feito com a demonstração da temperatura de saída dos tarugos, que teve uma relação com a média das temperaturas medidas nas zonas 3 e 4 (encharque). O gráfico da Fig. 9 mostra a variação destas temperaturas.

Destaca-se no gráfico acima que, de uma forma geral, a relação entre as temperaturas medida e calculada para ambas as variáveis apresentou um bom índice de acerto, com exceção dos momentos em que houve maior discrepância (pontos 46 e 61). Isto se deve ao aumento repentino do ritmo de produção aliado à redução do consumo de GN. Estas discrepâncias também demonstram que a dinâmica do programa suporta determinados graus de variação, mostrando certa deficiência nestes cálculos diante de variações súbitas de determinadas variáveis.

Os gráficos das Fig. 10 (a) e (b) apresentam a comparação entre as temperaturas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor de ar e de GAF respectivamente calculadas pelo programa e medidas pelos respectivos termopares.

Observa-se em ambos os gráficos uma boa aproximação dos valores calculados em relação aos valores medidos, mesmo tendo em vista as grandes variações das vazões de reagentes. O perfil muito parecido das curvas medido e calculado mostra também que o modelo de regressão criado para o cálculo da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelos recuperadores de calor foi bastante eficiente.

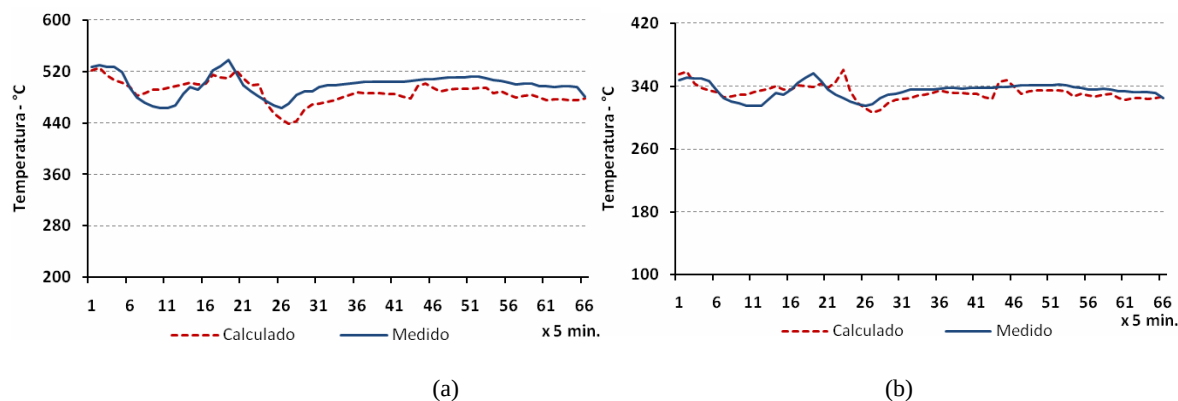


Fig. 10. (a) Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de ar – medido x calculado e (b) Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado.

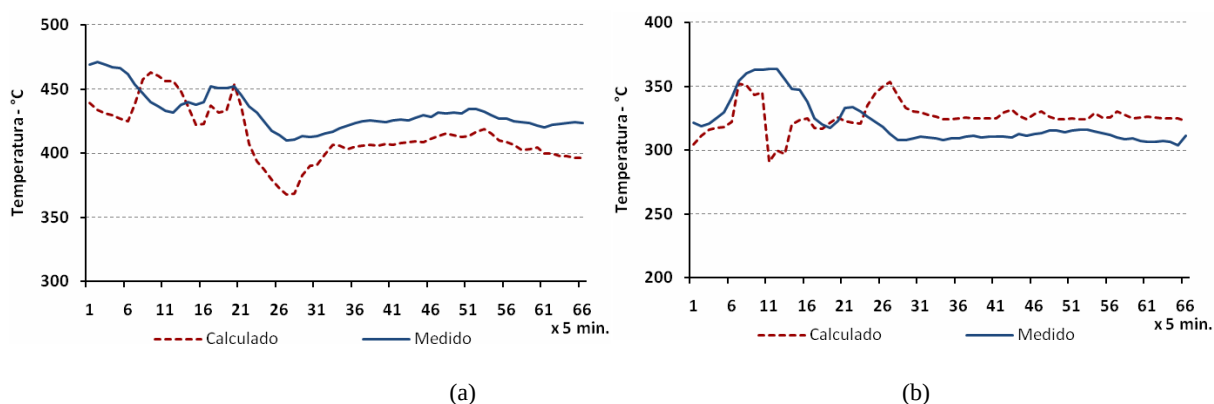


Fig. 11. (a) Variação da temperatura do ar após passagem pelo recuperador de calor de ar – medido x calculado e (b) Variação da temperatura do GAF após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado.

Os gráficos das Fig. 11 (a) e (b) mostram a comparação entre as temperaturas do ar e do GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores de calor, calculadas pelo programa e medidas pelos respectivos termopares.

Assim como no caso das temperaturas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores, observa-se uma boa aproximação dos valores calculados em relação aos valores medidos, mas foi observada uma discrepância nos valores quando ocorreram grandes variações nas vazões de reagentes, pelo motivo que a baixas vazões, o coeficiente de transferência de calor dos recuperadores sofre variação mais significativa. De um modo geral, quando operando em condições normais, esta curva tende a se estabilizar.

O gráfico das Fig. 12 (a) e (b) mostram a efetividade dos recuperadores de calor de ar e de GAF, calculadas pelo método de NUT e o rendimento do forno calculado pela razão entre a energia absorvida pelos tarugos e pela soma das entradas de energia do processo.

Observa-se no gráfico da Fig. 12 (a) um comportamento diferente comparando a efetividade de ambos os recuperadores de calor, pois esta variável é função da vazão mássica do fluido frio (ar e GAF), bem como da vazão mássica do fluido quente (produtos da combustão). Destaca-se que o valor da efetividade dos recuperadores de calor é diretamente proporcional à vazão dos fluidos frios e inversamente proporcional à vazão dos fluidos quentes, pois, conforme o método de NUT, quanto mais baixa for a taxa máxima de transferência de calor para o recuperador, maior será o seu rendimento. O contrário ocorre com a taxa real de transferência de calor do recuperador. Desta maneira, é correto afirmar que a maior efetividade

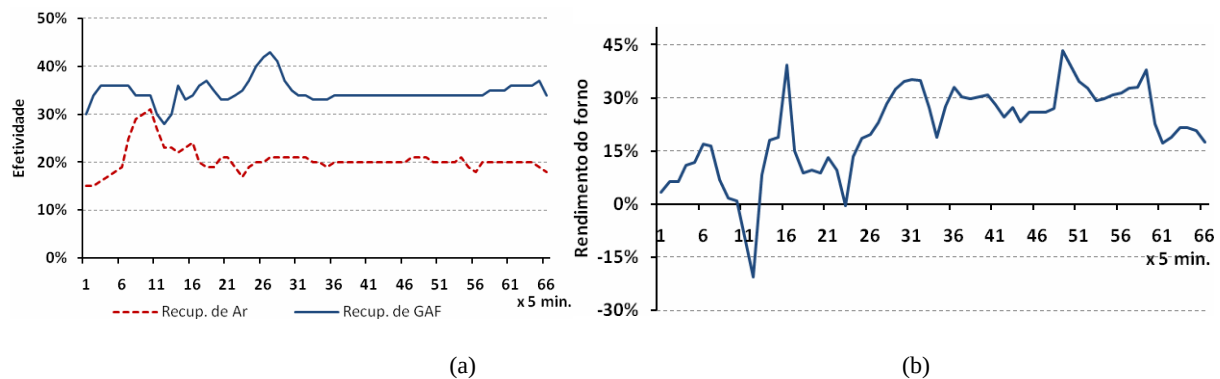


Fig. 12. (a) Variação da efetividade dos recuperadores de calor e (b) Variação do rendimento do forno.

de dos recuperadores de calor não significa ser a melhor condição operacional para o forno, pois deve ser priorizada a quantidade de energia necessária para o correto aquecimento dos tarugos.

Quanto ao rendimento do forno mostrado no gráfico da Fig. 12 (b), destaca-se os momentos em que esta variável obteve valores negativos, em função do baixo ritmo de produção, comparado à alta vazão de combustíveis na entrada. Observa-se também que, quando o forno operou nas suas condições mais estáveis o rendimento permaneceu com valores em torno de 30%. Em condições favoráveis, com um excelente e custoso projeto e com um bom funcionamento, pode-se obter rendimentos de até 60% [8]. De fato, no momento em que o forno opera com alta vazão de GN e baixa vazão de GAF o seu rendimento é maior, mas não significa que esta condição seja desejável devido ao alto custo operacional, portanto, devem ser feitas análises de custo-benefício para se determinar o maior rendimento desejável para o forno em questão.

Com todas as entradas e saídas de energia quantificadas em tempo real, é possível propor um método de gerenciamento do processo de aquecimento de tarugos em tempo real de forma a auxiliar os operadores e técnicos nas tomadas de decisões imediatas no sentido de melhorar a eficiência do processo de aquecimento de tarugos para laminação. É preciso ressaltar que o balanço térmico aqui tratado se refere aos valores globais do forno e as alterações nas condições operacionais devem ser feitas separadamente em cada zona, portanto a sensibilidade do operador é fundamental na fase dos ajustes visando alcançar o ponto ótimo de operação. De qualquer forma um modelo de gerenciamento em tempo real se apresenta como um grande passo para a melhoria do processo e aumento da competitividade da empresa.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida e testada uma metodologia para o cálculo do balanço térmico em tempo real do processo de aquecimento de tarugos para laminação de uma linha de produção de fio máquina da ArcelorMittal Monlevade. O modelo se mostrou fiel ao processo com boa precisão, tanto em condições permanentes como também em regimes transientes.

Os dados analisados durante o período da simulação mostraram que em condições normais de operação, o rendimento do forno se mantém na faixa de 30%, chegando a atingir picos acima de 40%. Apesar dos picos apresentados, a análise do rendimento deve ser feita tomando-se como base maiores números de ensaios operacionais considerando que esta variável sofre alterações principalmente em função do ritmo de produção, dos volumes e composição dos reagentes e da energia recuperada pelos recuperadores de calor de ar e de GAF, sendo assim, é possível através do acompanhamento sistemático do balanço térmico em tempo real, estabelecer faixas de rendimento satisfatórias para diferentes modos de operação, permitindo tirar maior proveito da energia fornecida para o aquecimento dos tarugos.

Em uma análise comparativa entre a temperatura de saída dos tarugos calculada e a temperatura medida nas zonas de encharque do forno (zonas 3 e 4), foram apresentadas diferenças em torno de 9%, mostrando um bom comportamento dos modelos de regressão e ajustes da dinâmica do forno.

O cálculo das temperaturas dos fluidos frios (ar e GAF) e do fluido quente (produtos da combustão) para os recuperadores de calor apresentou boa concordância com os valores medidos com desvios médios inferiores a 5%.

Outra variável importante e que contribui diretamente no melhor aproveitamento da energia no processo refere-se ao excesso de ar praticado nas reações de combustão. O efeito de transiente do forno apontou um tempo de resposta de mais de duas horas para o ajuste automático das variáveis pelo sistema de controle de combustão até que se atingissem as condições de estabilidade do processo.

Conclui-se finalmente que através do acompanhamento do balanço térmico em tempo real, será possível propor um modelo instantâneo de gerenciamento do processo com foco no ponto ótimo de operação e nos pontos fracos observados, visto que atualmente o modelo de gerenciamento é feito uma vez a cada turno e é focado principalmente nos consumos de reagentes e na produção efetiva.

REFERÊNCIAS

- [1] Scilab – The free software for numerical computation. Download page. Disponível em <http://www.scilab.org/products/scilab/download>. Acesso em 04. 01. 2010
- [2] Companhia de Gás de Minas Gerais, Gasmig. Análise química do GN, MG, jan. 2010
- [3] McBride, B.J., Gordon, S., Reno, M. A. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, 1993, NASA Technical Memorandum 4513
- [4] Hauck, G.A.C., Laia, L.L., Fornos de Reaquecimento, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM (2000)
- [5] Barros, J.E.M., Baêta, J.G.C., Estudo da Transferência de Calor em Motores, 2006. Disponível em http://mautone.eng.br/lectures_notes.htm. Acesso em 17/07/2010
- [6] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 5ª Edição, 2003, LTC – Livros Técnicos e Científicos
- [7] Pirani, M.J., ENG309 – Fenômenos de Transporte III. Disponível em <http://www.dem.ufba.br/download/ENG309/eng309.html>. Acesso em 17/07/2010 (2009)
- [8] Trinks, W., Mawhinney, M.H., *Hornos Industriales*, vol.1, Urmo, S.A. de Ediciones (1975)

REAL-TIME SIMULATION MODEL OF A BILLET REHEATING FURNACE FOR ROLLING MILL

Abstract – This paper presents the development of a mathematical computer model to simulate the heating process of billets in a rolling reheating furnace. The proposed method simulates the combustion process, calculating the energy input, output and losses inherent of the process. The computational algorithm of the furnace simulation allows the user to reproduce the combustion process from the reactants flow measurements at the entrance and their respective compositions and, thereafter, it calculates the products composition through a complete combustion model to lean mixing and incomplete combustion, at a chemical equilibrium equation for rich mixtures. The billets temperature is calculated by determining the heat transfer coefficient between the furnace atmosphere and the billets used for this, the forced convection with turbulent flow over an isothermal plate principle. The air energy and the Blast Furnace Gas energy recovered after passing through the heat exchangers is calculated using regression models developed empirically and the yields of such stoves are determined by the NTU effectiveness method (Number of Transfer Units). The loss by cooling water and the outer furnace walls are determined by simplified models, the other losses are calculated using an empirical regression model in which measured data is used in the process. To determine the final objective function, we adopted the Newton-Raphson method for finding roots. The simulation allows to calculate: the instantaneous process thermal balance, the furnace and heat exchangers efficiency, the chemical composition of the mixture of reactants and combustion products, the air excess used in the reaction, the reactants and combustion products temperature after passing through the heat exchangers; the billet temperature after heating and other important variables for process management. The model proved to be an effective tool for a more refined management of the process in real time.

Keywords – Heat Balance, Reheating Furnace, Energy Consumption.