



SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS¹

Eduardo Sérgio da Silva Gonçalves²
José Eduardo Mautone Barros³
Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro⁴
José dos Reis Vieira de Moura Júnior⁵
Leandro Pêgo Belisário⁶

Resumo

A execução de balanços térmicos feitos a partir de dados precisos e com o mínimo de simplificações torna-se uma ferramenta poderosa para a avaliação do desempenho energético dos fornos, permitindo priorizar esforços no sentido de reduzir o consumo de energia e, conseqüentemente, o custo do produto final. Este trabalho mostra uma metodologia para a simulação do processo de combustão de um forno de reaquecimento de tarugos para laminação aplicando-se diferentes perfis de operação do processo. O modelo consiste em realizar um cálculo dinâmico em que são introduzidas as variáveis de entrada, coletadas através do sistema supervisorio do forno e comparar com os dados do modelo criado. Por fim é feita uma análise da variação da eficiência do forno e dos recuperadores de calor.

Palavras-chave: Balanço térmico; Consumo; Energia; Forno de reaquecimento.

SIMULATION OF A COMBUSTION PROCESS OF A BILLET REHEATING FURNACE

Abstract

Real data-based energy balances with few simplifications are a powerful tool for furnaces energy performance evaluation, helping technical people to guide efforts in energy consumption issues, and consequently, in a final product cost reduction. This paper presents a methodology to simulate the combustion process in several operational conditions of a walking-hearth reheat furnace for billets in rolling mill facilities. The computational model consists, basically, in a dynamical solution which measured input variables are supplied from the furnaces supervisory and compared to measures by instruments in the system. Finally, it is made a variability analysis of the furnace and heat exchangers efficiencies.

Key words: Heat balance; Gas consumption; Energy evaluation; Reheating furnace.

¹ *Contribuição técnica ao 31º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 25º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 17 a 20 de agosto de 2010, Foz do Iguaçu, PR*

² *Engenheiro Mecânico, Mestrando em Eng. Mecânica da UFMG, Analista de Manutenção da Gerência de Engenharia de Manutenção da ArcelorMittal Monlevade*

³ *Engenheiro Mecânico, Dr. Eng., Professor Adjunto da Escola de Engenharia Mecânica da UFMG*

⁴ *Engenheiro Mecânico, Gerente de Engenharia de Manutenção da ArcelorMittal Monlevade*

⁵ *Engenheiro Mecânico, Dr. Eng., Especialista de Qualidade da Gerência de Controladoria e Melhoria Contínua da ArcelorMittal Long Carbon Americas*

⁶ *Estagiário da Gerência de Engenharia de Manutenção da ArcelorMittal Monlevade, estudante de Engenharia de Produção da UFOP*



1 INTRODUÇÃO

Os fornos de reaquecimento de uma usina siderúrgica são responsáveis por uma grande parcela no consumo global de energia, podendo chegar a 15% do total.⁽¹⁾ Por isso, muitos esforços são feitos no sentido de racionalizar o consumo de energia, reduzir custos, melhorar a qualidade do produto, aumentar a produtividade, etc. Para alcançar estes objetivos, muitas vezes o foco se volta para melhorias em diversas áreas envolvidas no processo como, por exemplo, refratários, projeto eletromecânico, instrumentação, automação e operação propriamente dita.

Outros autores já desenvolveram trabalhos para elaboração de balanços térmicos ou pelo menos necessitaram quantificar as entradas e/ou saídas de calor utilizando a equação geral da conservação da energia a fim de desenvolverem modelos matemáticos em diversas áreas e de fornos de diversos tipos.⁽²⁻⁸⁾ Gorni et al.⁽⁹⁾ utilizou um método de cálculo do balanço térmico para fornos em que são coletadas periodicamente todas as variáveis de entrada e saída do forno e, assim, são calculadas as parcelas de contribuição na liberação ou absorção de energia do processo. Este modelo torna-se tão preciso quanto for a confiabilidade dos instrumentos do forno. Desta forma mostrou-se possível verificar onde se concentravam as maiores perdas e estabelecer formas de corrigi-las. Trabalho semelhante foi desenvolvido por Carvalho,⁽¹⁰⁾ com algumas diferenças de concepção, entre as quais, destaca-se que neste último são fixados os rendimentos do forno, do recuperador de calor e do processo de combustão como parâmetros de ajuste do software desenvolvido, que simula os gases de combustão em qualquer composição e o excesso ou escassez de ar. Zhang et al.⁽¹¹⁾ construíram um modelo completo dividido em três partes, sendo um para obter as variáveis de entrada (*set points*) de temperatura do forno, outro que descreve a relação entre os *set points* e as vazões de combustíveis em cada zona e um modelo dinâmico que descreve o comportamento do forno de acordo com o fluxo de combustíveis. Este modelo demonstrou muita robustez e precisão nos resultados. A proposta deste trabalho consiste em mostrar um programa de simulação que é capaz de calcular vários dados de saída do forno a partir de determinadas variáveis de entrada, que são coletadas através de um sistema de gerenciamento de processo chamado PIMS (*Plant Information Management System*).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do Forno de Reaquecimento

O forno tipo *walking-hearth* (soleiras caminhantes) em estudo utiliza como principais combustíveis em sua matriz energética o, Gás de Alto Forno (GAF) pré-aquecido através de energia recuperada no recuperador de calor de GAF localizado no próprio canal de fumaça do forno e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), Podendo ser utilizado ainda o oxigênio (O₂) no enriquecimento do ar de combustão, que também são pré-aquecidos no recuperador de calor de ar.

O forno é dividido em quatro zonas principais, sendo:

- Zona 1: zona de pré-aquecimento. Constituída de 8 queimadores instalados na primeira parede frontal. Cobre a região de enforamento e possui as soleiras dentadas para melhor homogeneização da temperatura de pré-aquecimento.
- Zona 2: zona de aquecimento. Constituída de 8 queimadores na segunda parede frontal e possui soleiras planas.



- Zona 3: zona de homogeneização esquerda, constituída de 4 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 4 queimadores instalados no lado direito da parede frontal do desenformamento. Cobre a região da cauda do tarugo.

A estrutura do forno é mostrada na Figura 1.

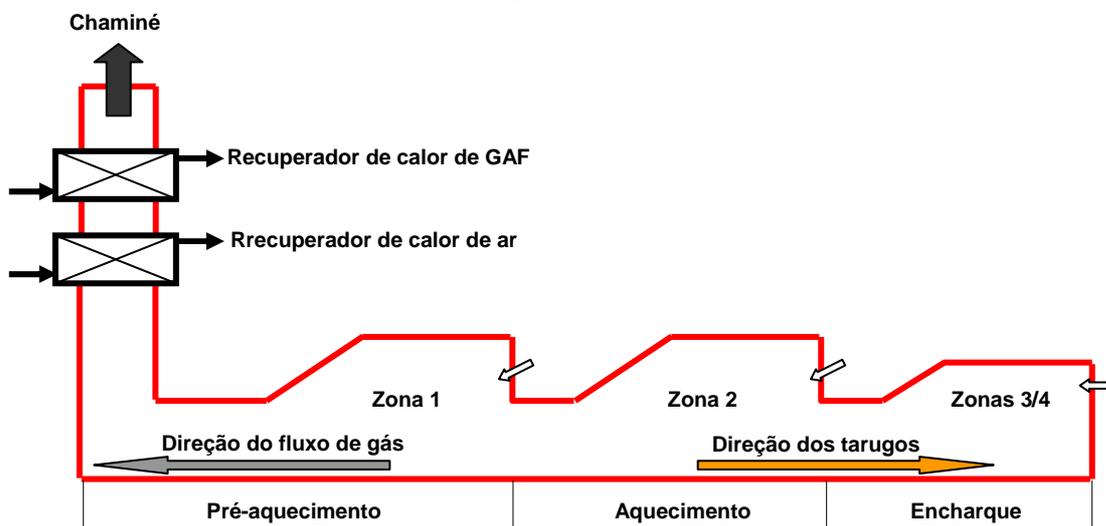


Figura 1: Estrutura do forno de reaquecimento de tarugos.

O forno possui um sistema de controle de combustão chamado de duplo controle cruzado que obedece ao ritmo de produção da laminação aumentando ou diminuindo as vazões de combustíveis e ar de combustão automaticamente de acordo com a variação da temperatura. Este sistema de controle visa garantir que não haja superaquecimento das soleiras, empeno de tarugos e desperdício de energia.

2.2 Metodologia para o Cálculo do Balanço Térmico

Para que um balanço térmico seja confiável, é preciso que se tenham medidores confiáveis e se faça o mínimo de simplificações e/ou suposições. Desta forma o balanço térmico torna-se uma poderosa ferramenta de gerenciamento de um processo que envolve aquecimento, pois indica a situação operacional do equipamento e auxilia na detecção e correção de anomalias mais rapidamente.

Para a construção do programa de simulação, foi utilizado o Scilab 5.2.0.⁽¹²⁾ As variáveis requeridas para a execução do programa são coletadas através do sistema PIMS, que faz a comunicação diretamente com o PLC do forno. A partir das variáveis de entrada, o programa realiza os cálculos das reações de combustão, da equação do balanço de energia, e das demais variáveis do programa.

O modelo utiliza como variáveis de entrada as vazões de GAF, GLP ou GN, ar de combustão e oxigênio. Utiliza também a composição química do GAF, a umidade do ar, o ritmo operacional do forno (vazão mássica de tarugos) e a temperatura dos produtos da combustão antes do recuperador de calor de ar. Para garantir a confiabilidade dos dados, todos os instrumentos de medição seguem um plano de calibração periódico sistematizado através de empresa credenciada contratada pela ArcelorMittal.



O GAF, combustível “abundante” produzido na usina siderúrgica, tem prioridade de consumo e apresenta grande variabilidade em sua composição de acordo com as condições operacionais do Alto Forno. Para a medição do teor dos principais componentes do GAF, é utilizado um analisador de gás *online* que transmite as informações em tempo real para o sistema PIMS. Os componentes medidos são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂) e o hidrogênio (H₂). Estes três componentes somam aproximadamente 50% da composição química do GAF, e o restante da mistura é formado pelo nitrogênio (N₂), completando assim os 100%. A umidade do GAF é calculada nas condições de entrada do recuperador de calor. O GLP, por ser um combustível dispendioso e 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 requer alguns cuidados, principalmente quando o consumo de oxigênio estiver alto. O GLP não apresenta grandes variações na sua composição química, podendo ser considerada fixa em 27,6% de propeno (C₃H₆), 19,2% de propano (C₃H₈) e 53,2% de butano (C₄H₁₀).⁽¹³⁾ Devido à substituição prevista do GLP pelo gás natural (GN) na ArcelorMittal Monlevade, o modelo foi preparado para trabalhar também com esta possibilidade e, assim como no caso do GLP, a composição química do GN sofre poucas variações que podem ser desprezadas por não serem capazes de afetar consideravelmente os cálculos da estequiometria da combustão. Por isso foi considerada uma composição fixa do GN com 93,4% de metano (CH₄), 4,29% de etano (C₂H₆), 1,2% de propano e 1,35% de dióxido de carbono.⁽¹⁴⁾

A composição do ar de combustão na base seca é de 79% nitrogênio e 21% de oxigênio. Esta composição varia de acordo com a porcentagem de injeção de oxigênio em relação à vazão de ar e, varia também com a sua umidade, que também é medida através de um medidor de umidade absoluta *online* e as informações também são disponibilizadas no sistema PIMS. Com todos estes dados, é possível calcular a composição química do ar de combustão na base úmida e, juntamente com os dados dos combustíveis, é possível calcular as reações de combustão.

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 da conservação da energia:

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

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 os fluxos das entalpias dos reagentes (energia dos combustíveis + ar + oxigênio) a 25°C e dos produtos da combustão respectivamente. O modelo suporta cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas. $\dot{Q}_{Tarugos}$ é a taxa de calor absorvido pelos tarugos no interior do forno, $\dot{Q}_{Refrigeração}$ e $\dot{Q}_{Paredes}$ representam a taxa de calor perdido para a água de refrigeração e pelas paredes laterais e frontais do forno respectivamente. \dot{Q}_{Carepa} é a taxa de calor liberado durante a formação da carepa no interior do forno, já que se trata de uma reação exotérmica.⁽¹⁾ A quantidade de carepa formada é influenciada por diversos fatores, tais como o tempo e a temperatura de aquecimento, composição dos gases presentes na atmosfera do forno, relação entre ar e gases de combustão, composição química do aço e velocidade do gás, podendo variar entre 0,5 a 2,5% da massa total do tarugo ou placa.⁽⁷⁾



A partir das vazões de GAF e GLP ou GN, de ar de combustão e de oxigênio e da umidade do ar, o modelo calcula a composição final e a entalpia da mistura dos reagentes para depois se fazer o cálculo da estequiometria da combustão, determinando o excesso de ar e a relação ar/combustível. A vazão de tarugos é necessária para o cálculo da quantidade de calor absorvido pelos mesmos e, embora o modelo seja capaz de calcular a temperatura dos produtos da combustão na saída do forno, é requerido, como variável de entrada, o valor da temperatura dos produtos da combustão antes do recuperador de calor de ar para o cálculo das trocas térmicas entre os produtos da combustão com o ar de combustão e com GAF. Isto se deve pelo fato de haver uma redução de temperatura necessária para a proteção do recuperador de calor e que é um tanto quanto difícil de calcular e/ou estimar. A Figura 2 mostra o fluxo das informações de entrada do programa e as informações de saída calculadas pelo modelo computacional.

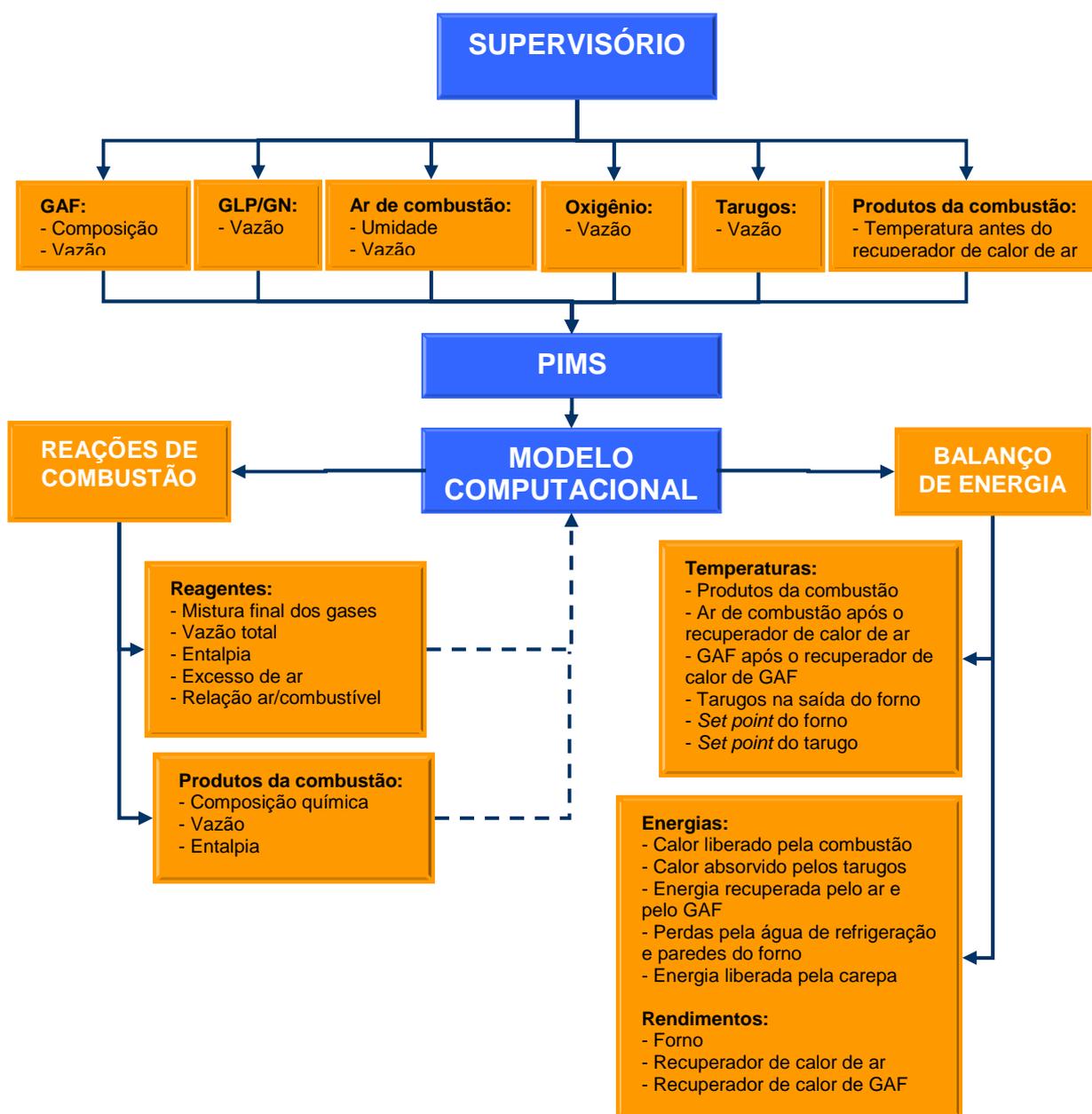


Figura 2: Estrutura do modelo computacional.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização da simulação do forno de aquecimento, foram considerados diferentes perfis operacionais através da variação das vazões de GAF, GLP, O₂ e conseqüentemente do ar de combustão (Figura 2) o ritmo de produção também sofreu variações a fim de verificar a robustez do modelo. Para a determinação do ritmo operacional do forno foi feita uma medição da massa de 190 tarugos e cronometrado o momento exato de entrada e saída de cada tarugo no forno. Os dados instantâneos foram armazenados pelo sistema PIMS e agrupados em valores médios a cada cinco minutos para depois serem inseridos no programa. No total foram gerados 47 dados em 3 horas e 55 minutos de simulação.

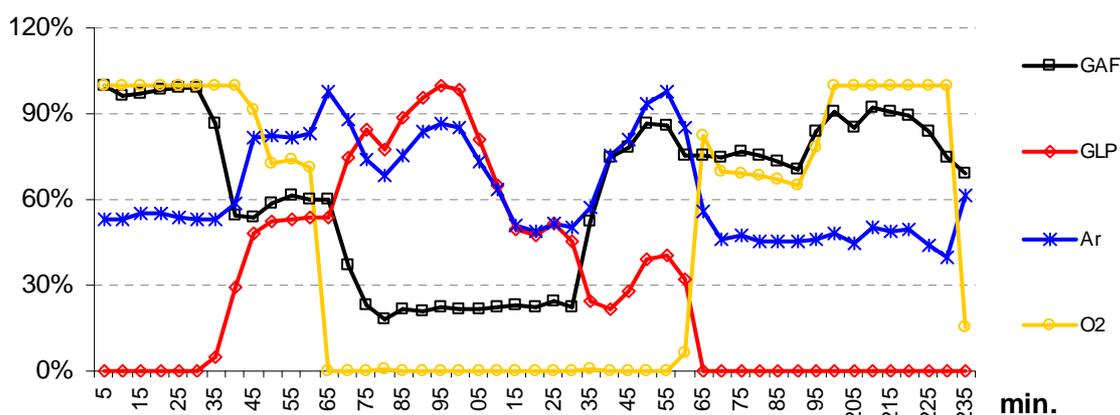


Figura 2: Variação das vazões dos Reagentes do forno durante a simulação.

Os resultados da simulação mostram que o modelo apresentou uma boa reprodução do comportamento dinâmico das variáveis do forno como pode ser visto nas próximas figuras.

As curvas das temperaturas do ar de combustão e do GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores de calor apresentaram perfis bastante semelhantes se comparados às curvas dos medidores de temperatura existentes, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4.

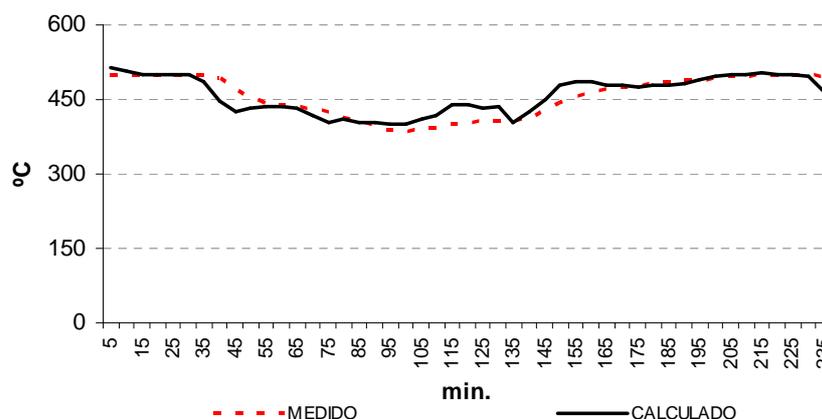


Figura 3: Temperatura do ar após o recuperador de calor de ar.

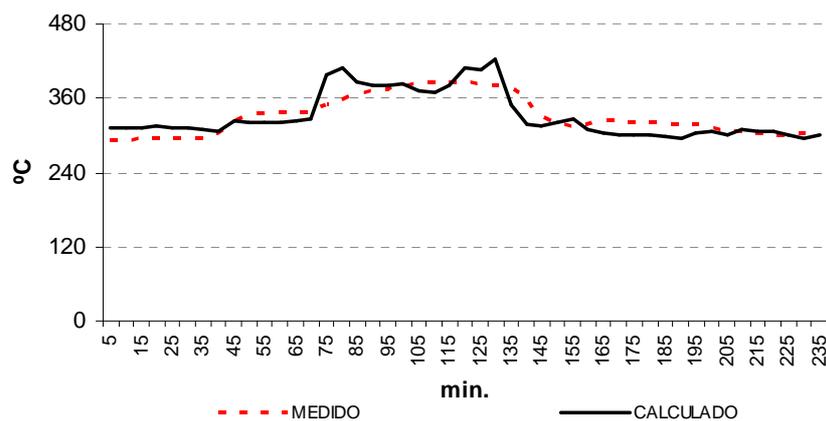


Figura 4: Temperatura do GAF após o Recuperador de Calor de GAF.

Da mesma maneira, as curvas das temperaturas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor também apresentaram perfis muito semelhantes comparados às curvas dos respectivos medidores como pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

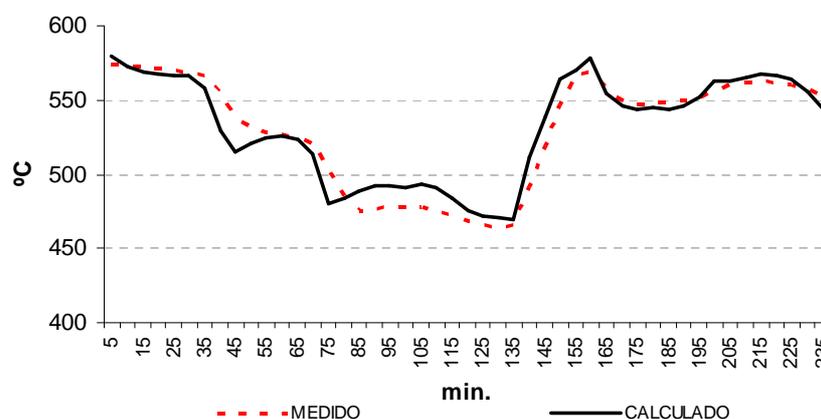


Figura 5: Temperatura dos produtos da combustão após o Recuperador de Calor de Ar.

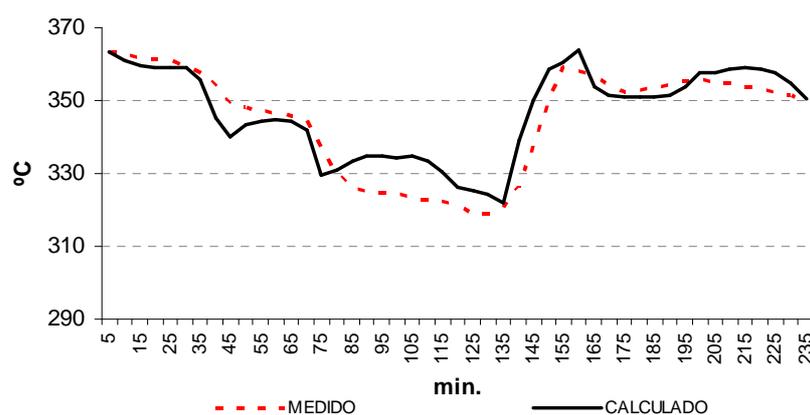


Figura 6: Temperatura dos produtos da combustão após o Recuperador de Calor de GAF.

Em ambos os casos, pode-se observar certa discrepância entre os valores medidos e calculados, isto é devido aos momentos em que houve grande variação das vazões dos combustíveis, provocando conseqüentemente a variação da vazão dos produtos da combustão. Isto reflete diretamente nos cálculos das trocas térmicas envolvidas nos recuperadores de calor, alterando consideravelmente a efetividade



dos mesmos, mas sem prejudicar qualitativamente os resultados da simulação. A variação da eficiência dos recuperadores de calor de ar e de GAF, calculada através do método da efetividade NUT (Números de Unidades de Transferência)⁽¹⁵⁾ pode ser observada na Figura 7.

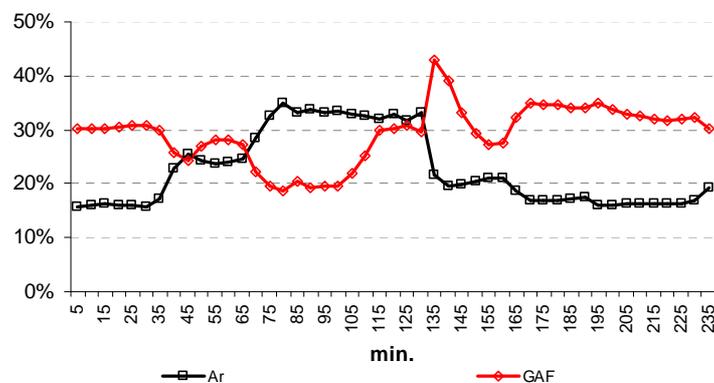


Figura 7: Efetividade dos Recuperadores de Calor de Ar e de GAF.

Da Figura 7, pode-se observar que o instante em que o recuperador de calor de ar se mostrou com maior eficiência se deu enquanto forno operava com alta vazão de GLP e baixa vazão de GAF e de ar de combustão, mostrando que o seu rendimento é melhor quando operando em baixas vazões. Pode-se afirmar o contrário em relação à eficiência do recuperador de calor de GAF, que apresentou melhor rendimento quando operando com altas vazões de GAF e de produtos de combustão. A variação das entradas e saídas dos calores envolvidos no processo (Figura 8) influencia diretamente no rendimento do forno (Figura 9), calculado através da razão entre o fluxo da entalpia dos tarugos na saída do forno (energia total dos tarugos na forma de calor) pela soma dos fluxos calor liberado pela combustão, com o recuperado pelos recuperadores de ar e de GAF e com o calor liberado devido a formação da carepa.⁽¹⁶⁾

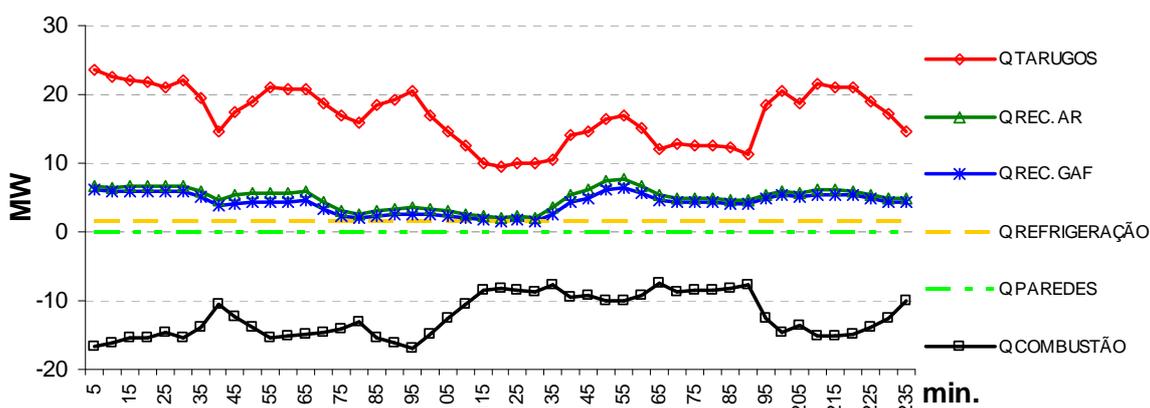


Figura 8: Calores liberados, absorvidos e perdidos no processo.

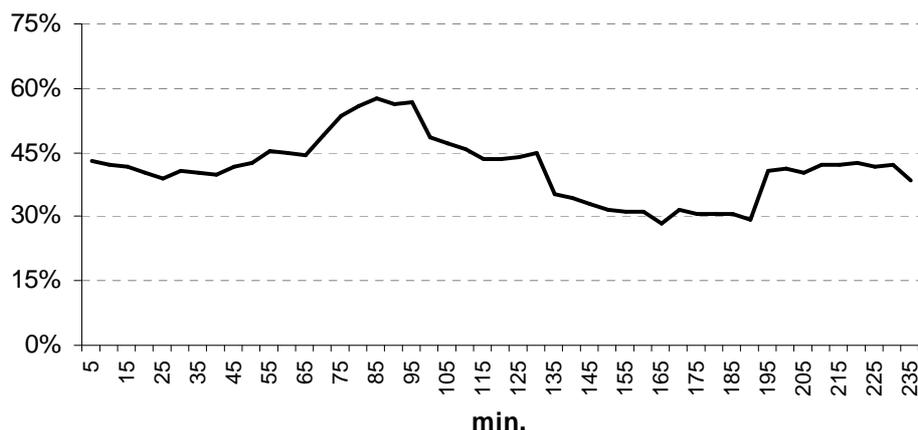


Figura 9: Rendimento do forno.

Pode-se observar que, assim como no caso do recuperador de calor de ar, o rendimento do forno atingiu o seu maior valor quando o forno operava com alta vazão de GLP e baixa vazão de GAF. Isto se deve principalmente pelo fato de o calor liberado pela combustão com GLP ter sido menor em relação à liberação de calor apresentada pela combustão do GAF. Pode-se observar também que o calor recuperado pelos recuperadores de ar e de GAF sofreu uma queda acentuada quando do aumento da vazão de GLP. O fato de o forno e os recuperadores de calor operarem com maiores rendimentos em determinadas circunstâncias não significa que aquela é a melhor condição. É preciso se fazer uma análise levando-se em conta fatores como segurança, qualidade do produto, impactos ambientais e custo energético. As Figuras 10, 11 e 12 auxiliam muito nesta tarefa, pois mostram como a composição química dos gases que compõem a atmosfera do forno é influenciada pela sua condição operacional. Na Figura 10 observa-se esta composição química que é determinada através de cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas.

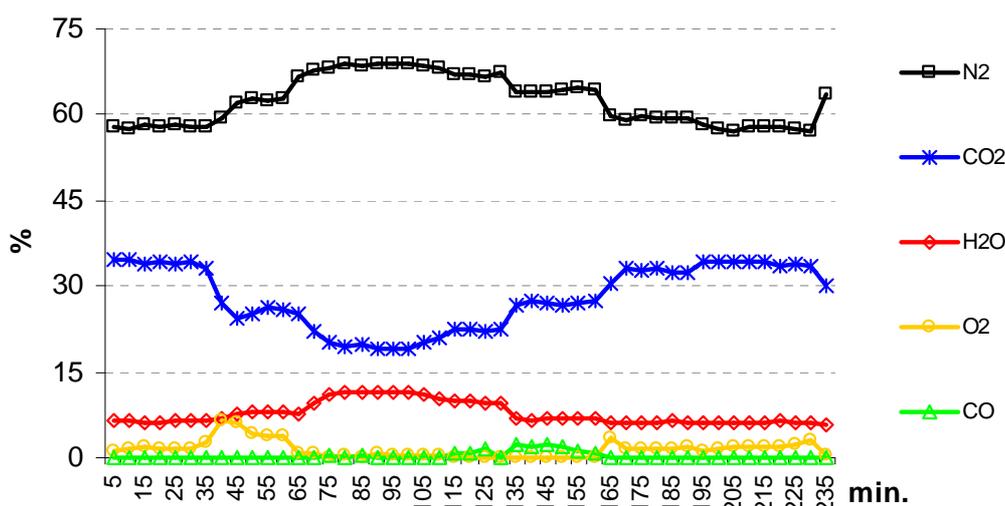


Figura 10: Composição dos produtos da combustão.

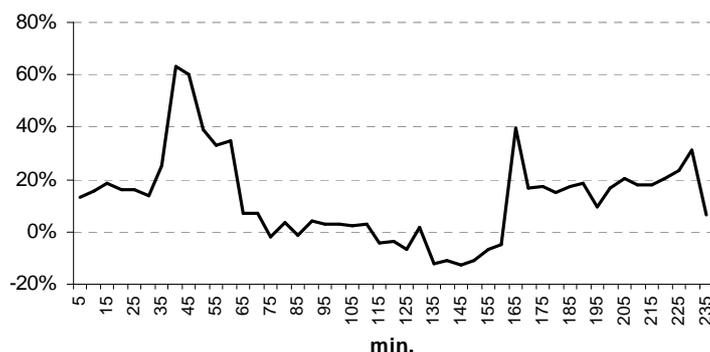


Figura 11: Excesso de ar da mistura.

A Figura 11 mostra a variação do excesso de ar utilizado na combustão. Analisando-se esta figura juntamente com a Figura 10, pode-se observar grandes oscilações na composição da atmosfera do forno em função da variação do excesso de ar, que é desejado dentro de uma faixa que varia de 5% a 15% em relação ao valor teórico para a queima. Valores acima de 15% (mistura pobre) geram influência direta na qualidade do produto, geração de carepa e no volume necessário de combustíveis para manter a temperatura do forno dentro da faixa requerida. Já a presença de CO nos produtos da combustão, provocada pela falta de ar na mistura (mistura rica), é indesejada por se tratar de desperdício de energia devido à emissão de combustível não queimado para a atmosfera.

4 PRÓXIMOS PASSOS

Os próximos passos imediatos serão o refinamento deste modelo separado pelo número de zonas do forno e a sua implantação *on line* com os dados disponíveis na tela do sistema supervisor. Será montada uma estrutura física para a implantação do programa e outra gerencial para sistematizar o gerenciamento das variáveis. Posteriormente, será feito um estudo visando automatizar as ações corretivas de acordo com os dados de saída do programa, como por exemplo, efetuar variações nas vazões dos combustíveis em função das temperaturas de *set point* do forno com o menor custo possível. Depois de feitas as melhorias, o programa será adaptado para operação no Laminador 2 da ArcelorMittal Monlevade e em outras unidades do grupo ArcelorMittal Américas. O cronograma dos próximos passos pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1: Cronograma dos próximos passos

Tarefas	Acumulado (%)	2010						2011									
		jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	
Compra do Hardware	5%	■															
Refinamento do modelo para operação por zona	20%		■	■													
Implementação do modelo <i>on line</i> no laminador 1 Monlevade	35%			■	■												
Testes/operacionalização	45%					■	■										
Revisão dos procedimentos operacionais	55%						■										
Estudo da proposta de automação da otimização do modelo	75%							■	■	■							
Abrangência de uso na ArcelorMittal Américas	100%											■	■	■	■	■	■

5 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que o modelo apresentado foi capaz de descrever o comportamento do forno com uma precisão bastante razoável e mostrou ótima



reprodução do comportamento dinâmico frente às alterações das variáveis de entrada do modelo. Discrepâncias foram observadas quando houve grandes oscilações nas condições operacionais do forno, mas sem prejudicar a análise dos resultados. Através do balanço térmico utilizado como uma ferramenta de gerenciamento do processo pode-se detectar várias possibilidades de melhoria e auxiliar na tomada de decisão, gerando grandes ganhos financeiros e de qualidade do produto com ações simples como corrigir a relação ar/combustível do forno.

REFERÊNCIAS

- 1 HAUCK, G.A.C., LAIA, L.L. Fornos de Reaquecimento. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, SP, mai. 2000.
- 2 TEIXEIRA, B.O.S., JOTA, F.G., TEIXEIRA, M.H. Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas. Revista Controle & Automação, v. 18, n. 1, jan., fev. e mar. 2007.
- 3 ARIMA, M.N., YOKAICHYIA, N.S., FARIAS, L.C. Análise da substituição de gás de coqueria por gás misto no forno de reaquecimento de placas da laminação de tiras a quente da COSIPA. 25º Seminário de Balanços Energéticos Globais e de Utilidades / 19º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais. SC, ago. 2004
- 4 LIU, Z., LI, L. An estimation temperature by analysis of transient heating of a slab in reheating furnaces. Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA 2009). RJ, out. 2009
- 5 JIA, L., LI, J. The experimental study on regenerative heat transfer in high temperature air combustion. Journal of Thermal Science, v. 13, n. 4, out. 2004.
- 6 MIRANDA, L.L., ZIVIANI, M., JÚNIOR, B.F. Modelagem matemática do processo do forno de reaquecimento WB2 da LTQ da Acesita. Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v. 3, n. 2, SP, out.-dez. 2008.
- 7 HSIEH, C.-T., HUANG, M.-J., LEE, S.-T., WANG, C.-H. Numerical study of a walking-beam-type slab reheating furnace. Numerical Heat Transfer Journal, Part A, 53: 966-981, 2008.
- 8 WANG, A.-H., CAI, J.-J., XIE, G.-W. Numerical Simulation of combustion characteristics in high temperature air combustion furnace. Journal of Iron and Steel Research, International. 2009, 16(2): 06-10.
- 9 GORNI, A.A., PEREIRA, M.M., FIALHO, R.R., PFEITSTICKER, G.K., SILVA, L.R., JR., P.F. Análise do desempenho de fornos para laminação e tratamento térmico através de balanço térmico. XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e de Utilidades, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, SP, ago. 2002.
- 10 CARVALHO, S.R., Desenvolvimento de um modelo matemático e computacional de um forno de recozimento. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, MG, nov. 2003.
- 11 ZHANG, B., CHEN, Z., XU, L., WANG, J. ZHANG, J., SJAO, H. The modeling and control of a reheating furnace. American Control Conference, AK, mai. 2002
- 12 The Free Platform for Numerical Computation. Download Scilab 5.2.0 version <http://www.scilab.org/products/scilab/download> Acesso em 01 jan. 2010
- 13 Fonte: Petrobras, Refinaria Gabriel Passos, REGAP. Análise química do GLP, MG, jan.-jul. 2009
- 14 Fonte: Companhia de Gás de Minas Gerais, GASMIG. Análise química do GN, MG, jan. 2010
- 15 INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., Fundamentos de transferência de calor e de massa. 5ª Edição, cap. 11, p. 463-467, 2003.
- 16 TRINKS, W., MAWHINNEY, M.H. Hornos industriales. v. 1, cap. 5, 1975.