

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORÍTMO PARA O PROCESSAMENTO, CONTROLE E ANÁLISE DE UM FORNO DE RECOZIMENTO DE AÇO SILÍCIO

Solidônio Rodrigues de Carvalho e Gilmar Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica

Campus Santa Mônica - Bloco M - Uberlândia - MG - Brasil

srcarvalho@mecanica.ufu.br gguima@mecanica.ufu.br

Resumo: *Apresenta-se nesse trabalho o desenvolvimento de um algoritmo para o processamento, controle e análise de um forno de recozimento de chapas de aço. A partir de parâmetros como o tipo de aço, a velocidade da linha, as dimensões da tira, os gases envolvidos no processo de combustão, os comburentes e o excesso ou a escassez de ar o modelo matemático fornece o perfil da temperatura de aquecimento da tira, a composição das fumaças, a vazão do ar estequiométrico, a vazão de fumaça, as temperaturas de chamas, a temperatura de “set-point” de cada zona do forno, o consumo específico do forno, o consumo térmico de cada zona e o rendimento do recuperador de calor. Observa-se que o programa deve ser usado em duas etapas. A primeira representa a fase de processamento onde o modelo deve ser alimentado pelas condições de operação, a temperatura da tira de aço em duas posições distintas e a temperatura no interior de cada zona do forno. Nessa fase são calculadas o rendimento do forno, o rendimento do recuperador e o rendimento do processo de combustão. A segunda etapa consiste no uso do modelo para a simulação das condições definidas pelo usuário, ou seja, a simulação do processo de combustão e o recozimento da tira. Nessa fase, a distribuição de temperatura da tira pode ser obtida a partir de dados de operação iniciais ou simulados, permitindo-se, nesse caso, a otimização de parâmetros de operação como a velocidade e dimensões da tira ou potência dos queimadores para a obtenção de um perfil de temperatura da tira desejado*

Palavras-chave: *forno de recozimento, otimização, problemas inversos em condução de calor*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe uma nova metodologia para a simulação do processo de recozimento do aço silício no interior de fornos tipo túnel, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos combustíveis. Para tanto, desenvolveu-se o software “SIMCO – Forno”, simulação e controle, que determina ainda a distribuição de temperatura na tira de aço silício.

São descritas a formulação das zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque, bem como o processo de recozimento da tira de aço silício, a partir da combustão dos gases. Modela-se também o processo de combustão dos gases bem como o do recuperador.

A proposta desse trabalho baseia-se na identificação de três parâmetros de ajustes, definidos como: o rendimento do forno; o rendimento do recuperador de calor; e o rendimento do processo de combustão.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Construído a partir de materiais refratários, o forno estudado representa um forno tipo túnel e é composto por uma zona de pré-aquecimento, três zonas de aquecimento e três zonas de encharque. Cada zona possui uma determinada quantidade de queimadores que, a partir da combustão de gases, geram o calor no interior do forno. A tira de aço silício é inserida na zona de pré-aquecimento e por meio de uma esteira é conduzida às demais zonas. A partir de dois pirômetros (sensores de temperatura) posicionados no interior do forno, tem-se acesso à temperatura da tira em duas posições distintas. Um esquema do alto-forno é mostrado na Fig. (1).

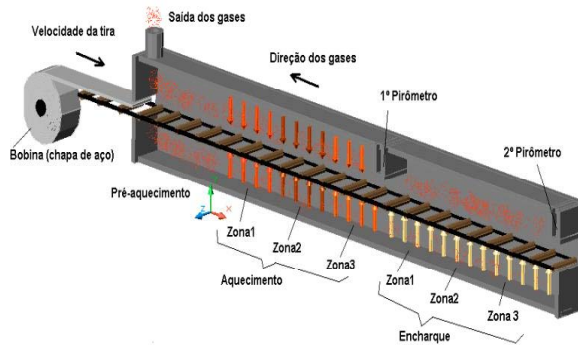


Figura 1 – Esquema do alto-forno tipo túnel

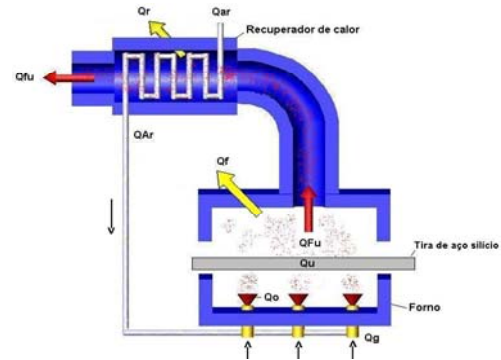


Figura 2 – Zona típica de um forno em detalhes

O programa “SIMCO - forno” reproduz o processo de recozimento da tira de aço silício devido a combustão em todas as zonas do forno e pelo processo de transferência de calor do forno para a tira de aço.

Para o processo de combustão consideram-se os seguintes combustíveis: gás de alto-forno (GAF) (em qualquer composição), gás liquefeito de petróleo (GLP), gás misto (GAF + GLP) e combustível líquido (Diesel). Além disso, adota-se que o ar fornecido ao processo de combustão é composto de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Ressalta-se que são simulados o excesso e a escassez de ar no processo de combustão. O programa desenvolvido determina ainda a composição, a vazão e a massa das fumaças antes e após o recuperador de calor - usado para pré-aquecer o ar fornecido ao processo de combustão. Detalhes da obtenção dessas variáveis podem ser encontrados em Carvalho, (2003).

2.1. O Balanço de Energia e a Combustão dos Gases

Segundo Machado et al. (1961), o processo de combustão deve levar em consideração as seguintes variáveis: a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), gerado pela combustão (Q_o), usado para aquecer a carga – calor útil (Q_u), perdido pelas paredes e aberturas do forno (Q_f), contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}), contido nas fumaças após o recuperador (Q_{fu}), fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{ar}) e perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador (Q_r). A Figura (2) apresenta em detalhes as notações sobre o processo de combustão.

Baseando-se na Fig. (2), propõe-se a aplicação de dois balanços de energia: no forno e no recuperador de calor (Machado et al, 1961), ou seja

$$Q_g + Q_{Ar} + Q_o = Q_{Fu} + Q_u + Q_f \quad (1)$$

$$Q_{Fu} + Q_{ar} = Q_{fu} + Q_{Ar} + Q_r \quad (2)$$

Entretanto, da Fig(1) observa-se que a vazão das fumaças na zona 6 interferem na zona 5 e assim sucessivamente. Nesse sentido, o balanço de energia deve incluir todas as zonas. Verifica-se nas Eqs. (1) e (2) que algumas variáveis podem ser calculadas conhecendo-se as características físicas do processo como vazão, pressão, temperatura e composição química dos gases. Dentre estas variáveis estão a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), gerado pela combustão (Q_o), contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}) e após o recuperador (Q_{fu}) e fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{ar}). Entretanto, outras variáveis como as perdas de calor através das paredes do forno (Q_f), o calor útil para aquecer a carga (Q_u) e a quantidade de calor perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador (Q_r) são de difícil identificação. A dificuldade reside na identificação dos materiais usados na construção do forno e do recuperador, da forma como esses materiais estão dispostos e unidos (resistência térmica de contato) ou da troca de calor com o ambiente por convecção e radiação.

A grande contribuição desse trabalho encontra-se no desenvolvimento de um procedimento para a determinação do calor útil Q_u realizado através do uso de técnicas de otimização e da definição de rendimentos do forno, do processo de combustão e do recuperador. Adicionalmente, a obtenção dos rendimentos permite a análise e o controle de todo o processo de combustão.

2.2 - O Processo de Combustão

Uma observação atenta da Eq. (2) revela que as quantidades Q_{Fu} , Q_{ar} , Q_{fu} e Q_{Ar} podem ser obtidas diretamente do processo de combustão, uma vez definidos parâmetros como, composição dos gases de combustão, seus percentuais volumétricos e vazões, a vazão de fumaça, calor específico de cada elemento e temperatura da fumaça. Uma descrição detalhada desses cálculos pode ser encontrada em Carvalho, (2003).

Conhecida a vazão mássica dos elementos, efetua-se o cálculo estequiométrico obtendo-se a vazão de ar necessária à combustão completa do GM. Nesse caso, a vazão de ar estequiométrica é comparada à vazão de ar fornecida, determinando-se o excesso ou escassez da vazão de ar fornecida à zona 6.

Uma vez conhecido o número de moles dos reagentes e produtos da combustão na forma estequiométrica (Carvalho, 2003) tem-se a informação necessária para o cálculo das variáveis de processo que são: a quantidade de calor fornecido pelo combustível (Q_g), a quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão (Q_{Ar}), a quantidade de calor gerado pela combustão (Q_o), a quantidade de calor contido nas fumaças que saem do forno (Q_{Fu}), a quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador (Q_{fu}) e a quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador (Q_{ar}).

Pode-se verificar na Eq. (1) que $Q_g + Q_{Ar}$ representam a variação da entalpia dos reagentes da combustão, Q_o representa a entalpia de reação nas condições padrões (25°C e 1 atm) e Q_{Fu} representa a variação da entalpia dos produtos da combustão. Assim, rescrevendo a Eq. (1), tem-se

$$\Delta H_{reagentes} + \Delta H_{reação}^o = \Delta H_{produtos} + Q_u + Q_f \quad (3)$$

Entretanto, a entalpia dos reagentes pode também ser obtido por (Himmelblau, 1982),

$$\Delta H_{reagentes} = \int_{25^{\circ}C}^{T_g} C_p(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} C_p(T) dT \quad (4)$$

onde T_g representa a temperatura do combustível, T_{Ar} representa a temperatura do ar pré-aquecido e $C_p(T)$ representa o calor específico dos elementos químicos que compõem o gás, ar e as fumaças podendo ser expresso na forma de um polinômio de terceiro grau (Himmelblau, 1982) como

$$Cp(T) = 1000 \times \sum_{i=1}^n \left[Nmoles_i \times (A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^3) \right] \left[\frac{J}{^\circ C} \right] \quad (5)$$

onde n representa o número de elementos da mistura e $Nmoles$ o número de moles de cada elemento do gás da mistura, A_i , B_i , C_i , D_i , são as constantes do ajuste polinomial de cada elemento.

A entalpia padrão da reação representa a escolha inicial de um estado de referência, no qual o calor da reação é conhecido. Assim, pode-se escrever

$$\Delta H^0_{reação25^\circ C} = 1.0 \times 10^6 \times \sum_{i=1}^n (N^\circ de moles_i \times \Delta H^0_{f_i}) \quad (6)$$

onde ΔH^0_f representa a entalpia padrão de formação dos compostos à 25°C e 1 atm (Himmelblau, 1982). Para se determinar a entalpia padrão de reação, Eq.(6), deve-se conhecer o cálculo estequiométrico dos reagentes envolvidos e a entalpia padrão de formação dos elementos (Carvalho, 2003). Assim, a variação da entalpia dos produtos da combustão ($\Delta H_{produtos}$) pode ser dada por (Himmelblau, 1982),

$$\Delta H_{produtos} = \int_{25^\circ C}^{T_{Fu}} Cp(T) dT \quad (7)$$

onde T_{Fu} representa a temperatura das fumaças. A temperatura das fumaças, por sua vez, pode ser obtida por (Carvalho, 2003)

$$\int_{25^\circ C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^\circ C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H^0_{reação} = \int_{25^\circ C}^{T_{Fu}} Cp(T) dT + Q_c \quad (8)$$

onde Q_c representa o calor perdido pelas paredes do queimador durante o processo de combustão. Observa-se que a Eq. (8) representa o balanço de energia aplicado a um queimador do forno. Conhecidas as temperaturas dos gases (T_g) e do ar pré-aquecido (T_{Ar}), verifica-se nesta equação a existência de duas incógnitas: a temperatura das fumaças (T_{Fu}) e o calor perdido no processo de combustão (Q_c). Nesse ponto, torna-se necessário a aplicação de uma metodologia que possibilite a obtenção de uma dessas variáveis. Observa-se que a determinação direta de Q_c exige a identificação das dimensões e propriedades térmicas dos queimadores bem como das propriedades dos materiais que entram em contato direto com a superfície externa do queimador.

Uma forma simples e direta para evitar-se essa complexidade é o cálculo do calor perdido no processo de combustão a partir da medição da temperatura das fumaças, no interior de cada zona de aquecimento do forno. Nesse caso, uma vez identificado T_{Fu} obtém-se Q_{Fu} e o rendimento do queimador pode ser definido como

$$\eta_c = \frac{Q_{Fu}}{\int_{25^\circ C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^\circ C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H^0_{reação}} \quad (9)$$

Dividindo-se ambos os lados da Eq.(8) pelo seu membro esquerdo e usando a definição (9) obtém-se a equação para o cálculo de Q_c , ou seja,

$$Q_c = \left(\int_{25^{\circ}C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^o \right) \times (1 - \eta_c) \quad (10)$$

Ressalta-se que cada região do forno é composta por um número definido de queimadores cujas dimensões variam a cada zona o que indica a necessidade da determinação do rendimento do processo de combustão de cada zona.

Nesse ponto, o modelo pode ser usado em duas formas diferentes. Uma vez determinado o rendimento de cada zona e supondo-os constantes, pode-se simular a combustão e obter-se Q_c e a temperatura das fumaças a partir de qualquer vazão de combustível e ar.

Um procedimento análogo pode ser usado para a definição do rendimento do recuperador, através do conhecimento das temperaturas de entrada e saída de ar e das fumaças. Nesse caso, define-se η_r como

$$\eta_r = \frac{\int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{fu}} Cp(T) dT}{\int_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{ar}} Cp(T) dT} \quad (11)$$

ou seja, o rendimento do recuperador é dado pela razão entre a soma do calor das fumaças e do ar na saída e na entrada do recuperador. Da mesma forma anterior, obtém-se Q_r manipulando-se a Eq.(11) como

$$Q_r = \left(\int_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{ar}} Cp(T) dT \right) \times (1 - \eta_r) \quad (12)$$

Observa-se que inicialmente o programa é alimentado com os parâmetros de operação medidos no forno que são: i) a composição, vazão, pressão e temperatura dos componentes da combustão (ar, GLP, GAF, GM); ii) a pressão no interior do forno; iii) a temperatura das fumaças antes e após o recuperador. Caso a fase seja de processamento, torna-se necessário o cálculo do rendimento do processo de combustão e o fornecimento da temperatura no interior de cada zona do forno.

A partir dos parâmetros de entrada o programa inicia o cálculo do processo de combustão nos pilotos e queimadores. Inicialmente determina-se a vazão de ar estequiométrica nas condições normal de temperatura e pressão (CNTP). Essa vazão é comparada à vazão de ar fornecida ao queimador, o que indica se este está operando com excesso ou escassez de ar e permite comparação com os resultados monitorados no forno que têm como base as CNTP. Em seguida, o programa determina a vazão de ar estequiométrica nas condições do processo obtendo-se assim o valor real da vazão estequiométrica de ar e da entalpia padrão de reação.

Na seqüência, define-se a fase atual do processo de combustão (processamento ou simulação). No processamento é calculado o rendimento do processo de combustão, e em seguida determinado a temperatura adiabática de chama. Se o usuário optar pela simulação do processo de combustão, então a partir do conhecimento prévio do rendimento do processo pode-se efetuar a cálculo da temperatura das fumaças, da temperatura adiabática de chama. Verifica-se que a partir dos cálculos anteriores o algoritmo tem toda informação necessária para a determinação da potência entregue a zona.

Na seqüência, o algoritmo verifica se todas as zonas do forno foram simuladas, caso não tenham sido, o calor presente nas fumaças da zona anterior é fornecido a zona seguinte, até que se atinja a zona de pré-aquecimento quando então se determina a potência entregue ao pré-aquecimento, o volume, e composição das fumaças e o rendimento do recuperador de calor.

A partir da potência entregue a cada zona do forno, o programa estará apto para a otimização e simulação do processo de aquecimento da tira de aço.

Uma análise na Eq.(1) revela que os dois parâmetros remanescentes, Q_u e Q_f , ainda são desconhecidos.

Analogamente, pode-se definir as perdas do forno em função do calor útil entregue pelo processo de combustão como

$$\eta_F = \frac{Q_u}{\int_{25^{\circ}C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^o} \quad (13)$$

e portanto, como nos procedimentos anteriores pode-se obter

$$Q_f = \left(\int_{25^{\circ}C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^o \right) \times (1 - \eta_F - \eta_{Fu}) \quad (14)$$

onde η_{Fu} representa o calor perdido nas fumaças que saem do forno e é dado por

$$\eta_{Fu} = \frac{\int_{25^{\circ}C}^{T_{Fu}} Cp(T) dT}{\int_{25^{\circ}C}^{T_g} Cp(T) dT + \int_{25^{\circ}C}^{T_{Ar}} Cp(T) dT + \Delta H_{reação}^o} \quad (15)$$

Observa-se, porém, que ao contrário dos rendimentos do recuperador e queimadores, as perdas de calor por convecção e radiação através das paredes do forno, não dependem exclusivamente de parâmetros operacionais como temperatura de fumaça, chama ou calor específico ou vazão de gases. Logo, apenas a equação de balanço, Eq.(1) não pode ser usada para a obtenção dos dois parâmetros. Propõe-se, nesse caso, a identificação do calor útil necessário ao aquecimento da tira, Q_u de forma independente do processo de combustão, através do uso de técnicas de otimização. Uma vez identificado Q_u , as perdas de calor e o rendimento do forno são prontamente obtidos pelas Eqs. (13)-(15). A Eq.(1), nesse caso, é usada na obtenção da potência máxima entregue no processo de combustão, auxiliando no processo de otimização empregado.

Resumindo, Q_u , nesse trabalho, é estimado através do uso de técnicas inversas considerando-se apenas o modelo termofísico da tira de aço no interior do forno. Entretanto, a informação da potência máxima como limite superior no processo de otimização é fundamental e permite, por sua vez, a identificação do calor útil através da técnica de otimização seção áurea.

Uma vez identificados o calor útil entregue à tira e determinados os rendimentos através dos parâmetros operacionais do forno o modelo computacional está apto a simular a temperatura da tira através da variação de qualquer parâmetro operacional do forno, como velocidade e espessura da tira, temperatura de chama, temperatura de fumaça, vazão de ar ou combustível entre outros.

Apresenta-se a seguir o modelo termofísico da tira e o processo de otimização usado para obtenção do calor útil necessário à obtenção de um perfil de temperatura desejado na tira.

2.3 – Modelo Térmico para a Distribuição de Temperatura na Tira de Aço

2.3.1 – Problema Direto

Um passo importante e fundamental para a comprovação da hipótese de rendimentos constantes é a determinação do calor útil entregue à tira pelo processo de combustão. A identificação desse calor ou o seu conhecimento permite a solução do problema térmico de aquecimento da tira.

Esse procedimento é chamado aqui de problema direto e é apresentado pela Figura (3).

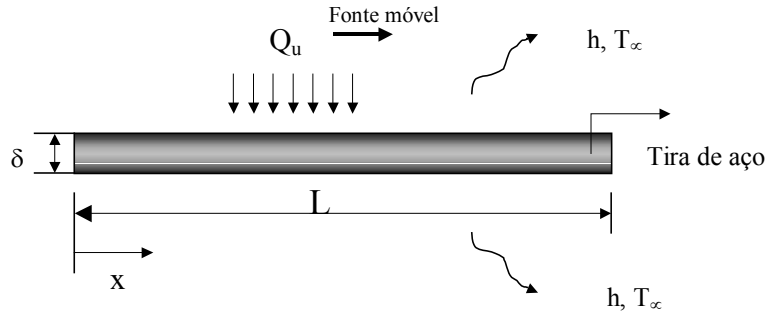


Figura 3 – representação do problema térmico aplicado à tira de aço

Na Figura (3) L , δ e V representam o comprimento, a espessura e a velocidade da tira de aço, respectivamente. Assumindo-se, nesse caso, que a difusão do calor ocorra somente na direção do comprimento da tira e desprezando-se as variações de temperatura nas outras direções. O modelo térmico pode então ser obtido pela solução numérica da equação da difusão unidimensional transiente descrita por

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Qu''(\varepsilon,t)}{k(T)\delta} - \frac{h_{forno} A (T(x,t) - T_\infty)}{k(T)\delta} = \frac{1}{\alpha(T)} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (16)$$

submetido às condições de contorno

$$-k(T) \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h (T(0,t) - T_\infty) \quad \text{e} \quad k(T) \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

e à condição inicial

$$T(x,0) = T_0 \quad (18)$$

onde $\varepsilon = V * t$ representa a posição do fluxo de calor em função da velocidade da tira e do tempo de simulação, $Qu''(\varepsilon,t)$ representa o fluxo de calor útil recebido pela tira por radiação, h_{forno} representa o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a tira e as fumaças no interior de cada zona do forno e $k(T)$ e $\alpha(T)$ representam, respectivamente, a condutividade e a difusividade térmica em função da temperatura da tira.

Obtém-se a solução das Eqs. (16) – (18) através do método de volumes finitos (Maliska, 1995). Ressalta-se, entretanto, que a solução do problema direto só é possível a partir do conhecimento do fluxo de calor útil recebido pela tira por radiação ($Qu''(\varepsilon,t)$). Esse calor por sua vez que pode ser estimado através de um procedimento de otimização é descrito a seguir.

2.3.2 - Problema Inverso: Seção Áurea (Golden Section)

Propõe-se a obtenção de Q_u através da minimização da função erro quadrática definida por

$$F = \sum_{i=0}^{np} (Y(x)_i - T(x)_i)^2 \quad (19)$$

onde n_p representa o número de sensores de temperatura (pirômetros), Y representa a temperatura medida pelos pirômetros e T a temperatura calculada através do modelo. Ou seja, Q_u é obtido através da comparação entre a temperatura calculada pelo modelo térmico e as temperaturas medidas na superfície da tira em duas posições específicas no interior do forno.

Para a minimização deste funcional optou-se pela técnica de otimização da Seção Áurea (Vanderplaats et al., 1984). Os principais fatores que influenciaram esta escolha foram: a necessidade de um processo iterativo para a diminuição de um intervalo de incerteza a partir da minimização de um funcional e a baixa complexidade para a implementação computacional.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os rendimentos do forno, do recuperador de calor e do processo de combustão são determinados através da execução de dez testes experimentais em condições reais de operação do forno em estudo. Em cada teste, é realizada uma comparação entre os dados experimentais medidos no forno e os resultados estimados pelo programa SIMCO - forno. Dentre os parâmetros analisados citam-se: i) o excesso ou escassez de ar na combustão; ii) a temperatura no interior do forno de cada zona e iii) a temperatura da tira medida pelos pirômetros. Observa-se, ainda, que nos testes apresentados a seguir, são modificados os parâmetros de operação do forno como, mudanças na combustão, na velocidade e na temperatura da tira.

A Figura (4) apresenta a distribuição de temperatura na tira de aço para um teste típico.

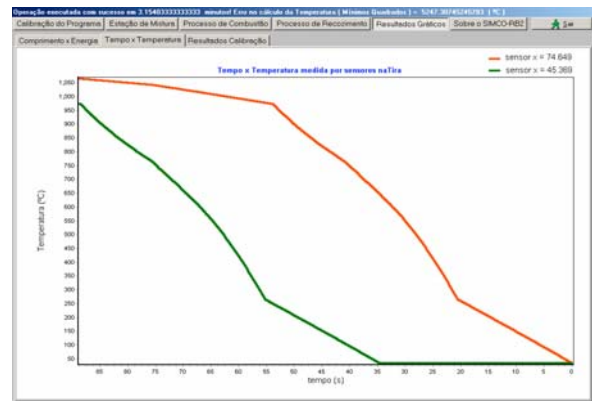
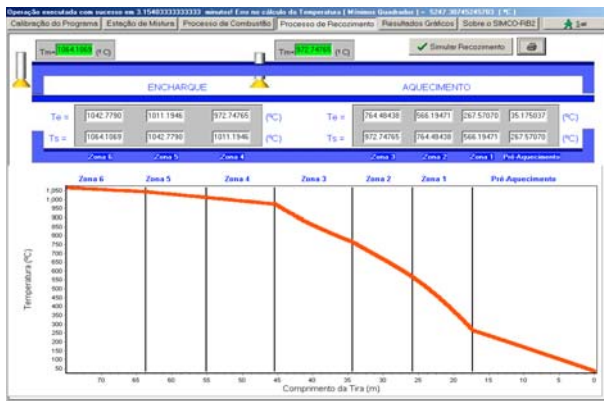


Figura 4 – Distribuição da temperatura na tira de aço Figura 5 – Evolução da temperatura em duas posições

Observa-se na Fig. (4) a evolução da temperatura ao longo do forno, resultando na obtenção do perfil desejado, na Zona 6. O uso do modelo permite então a análise da atuação de cada queimador e a conseqüente produção do perfil de temperatura em função de um tratamento térmico específico.

A partir do software SIMCO – forno é possível ainda a determinação da temperatura da tira em função do tempo de aquecimento no interior do forno. Para isso, o programa simula dois sensores fixados à tira de aço durante o processo de recozimento. Nesse caso, ao fim do aquecimento, a posição destes sensores coincide com a posição do primeiro e do segundo pirômetro. Este procedimento permite a comparação entre a temperatura medida pelos pirômetros e a temperatura calculada pelo programa. A Figura (5) apresenta as temperaturas calculadas para o primeiro teste em função do tempo de aquecimento.

Observa-se que, como mencionado, para a obtenção do perfil de temperatura da tira, torna-se necessário o processamento dos dados de entrada (dados de operação) para a conseqüente obtenção dos rendimentos do forno, recuperador e queimadores.

A Figura (6) por sua vez apresenta o comportamento dos rendimentos de cada processo efetuados para os dez testes estudados.

Verifica-se nesse caso que o recuperador de calor consegue manter aproximadamente 93% da energia total das fumaças, favorecendo o aquecimento do ar entregue ao processo de combustão, o que é bastante satisfatório.

Entretanto, no processo de combustão verifica-se que mais de 70% da energia gerada é perdida durante a combustão. Atribui-se o baixo rendimento deste processo, à troca de calor entre o frasco reacional e as paredes do queimador, à ionização, à reação incompleta e à formação de radicais livres.

Verifica-se ainda que o rendimento do forno indica que 60% do calor gerado na combustão é entregue à tira. Credita-se este alto rendimento aos aspectos construtivos do forno como: projeto, montagem, propriedades térmicas dos materiais usados e à disposição e forma como estes foram unidos evitando aberturas ao longo do forno. O erro relativo médio entre a temperatura calculada pelo modelo térmico e a temperatura real medida na tira de aço é de aproximadamente 5%, o que é bastante satisfatório levando-se em consideração as altas temperaturas envolvidas.

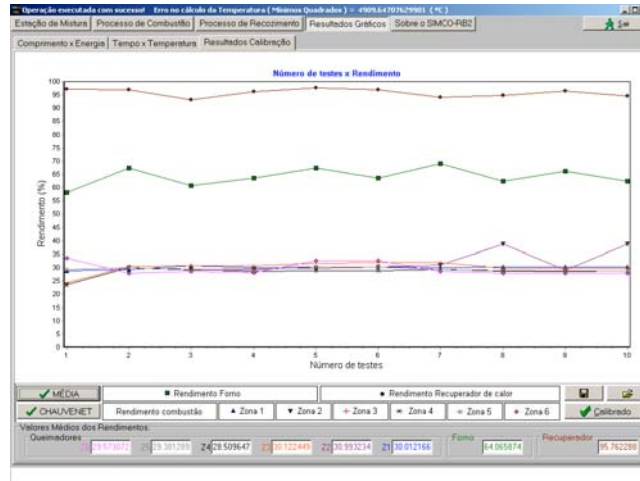


Figura 6 - Análise do rendimento dos processos.

Pode-se verificar ainda na Fig. (6) que o rendimento do recuperador de calor e do forno se mantém constante nos dez testes, sofrendo oscilações de aproximadamente 2% a 4%, o que de fato já era esperado devido às incertezas nos parâmetros medidos no forno. Da mesma forma a variação do rendimento do processo de combustão se mostra satisfatória, apresentando uma oscilação máxima de 6%. Entretanto, para uma análise qualitativa do rendimento do processo de combustão em cada zona do forno são necessários mais testes experimentais. Isto se deve às oscilações apresentadas nas zonas 2, 3, 4 e 5. Estas oscilações podem ser explicadas considerando que nestas zonas o forno está livre para ajustar a combustão, ou seja, o operador do forno fornece uma vazão de referência para cada zona, “set point”, e assim o forno automaticamente se ajusta à esta vazão, oscilando em torno do “set point”, o que aumenta a incerteza na medição da vazão. Isto se torna ainda mais evidente analisando as zonas 1 e 6, que ao contrário das demais, apresentaram rendimentos bastante satisfatórios, pois assim como descrito, essas zonas operam com vazões fixas de gás e ar, o que minimiza a incerteza na medição dos parâmetros no forno.

4. CONCLUSÃO

Apresenta-se nesse trabalho uma ferramenta importante para o controle e simulação do processo de recozimento das tiras de aço silício. A metodologia proposta é simular o processo de combustão no alto-forno e o aquecimento da tira de aço que se move em seu interior. Para isto, desenvolveu-se o algoritmo computacional SIMCO – forno, simulação e controle que permite ao usuário a reprodução do processo de combustão, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos gases combustíveis. Além disso, o programa calcula a temperatura adiabática de chama e a temperatura de set point no interior de cada zona do forno. Como objetivo final, o usuário tem acesso à distribuição de temperatura na tira de aço em qualquer instante ou posição no interior do forno.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da ACESITA e das agências governamentais CNPq, CAPES e FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvalho, S. R., 2003, “Desenvolvimento de um modelo matemático e computacional de um forno de recozimento”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- Himmelblau, David M.; 1982, "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering", by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 07632.
- Revolução industrial - 28. 08. 2003
- Machado, Adelmo Crespo; Oliveira, Gilberto Fagundes; 1961, “Sistema de Energia na Siderurgia”, ABM, Ed.Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda.
- Maliska, C. R., 1995, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- Vanderplaats, Garret N.; 1984, “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, by McGraw-Hill, Inc., pp. 43.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL MODEL OF FURNACES FOR CONTINUOUS STEEL STRIP PROCESSING

Solidônio Rodrigues de Carvalho e Gilmar Guimarães
Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica
Campus Santa Mônica - Bloco M - Uberlândia - MG - Brasil
srcarvalho@mecanica.ufu.br gguima@mecanica.ufu.br

Abstract: *This study presents the development of a mathematical and computational model for simulating and controlling of an annealing process of silicium steel strip that occur in a combustion industrial furnace. Both the combustion process and the strip heating are simulated by using energy and mass balances inside the industrial furnace. These balances are performed considering important variables such as composition, temperature and pressure of gas components, adiabatic flame and environmental temperature. Besides the balances, an optimization technique is implemented in order to estimate the temperature distribution of the strip at any time. The optimization technique used is the golden section algorithm that minimizes a least square function based on difference of the experimental and theoretical temperature in two different locations of the strip.*

Keywords: *Industrial Oven. Optimization. Annealing. Combustion. Temperature*