

FERRAMENTA PARA CONTROLE DE FORNOS DE AQUECIMENTO, REAQUECIMENTO E TRATAMENTO TÉRMICO*

Roberta Barros¹
Lis Nunes Soares²
Ricardo Junqueira Silva³
Sara Regina Ferreira de Faria⁴
Gabriel Laguárdia de Lima⁵

Resumo

Este artigo objetiva a apresentação de uma ferramenta capaz de simular e controlar o aquecimento, reaquecimento ou tratamentode tubos/blocos em tempo real. O sistema desenvolvido permite simular a temperatura final do elemento, ciclo do forno e tempo de encharque para variadas situações de carregamento, geometria do forno e dimensões da peça. Dessa forma, tem-se maior controle e otimização de fornos de aquecimento de blocos, reaquecimento e tratamento térmico de tubos promovendo aumento de produtividade, redução de variabilidade e otimização das curvas de tratamento. Esse modelo utiliza um sistema de equações de transferência de calor discretizadas em volumes de controles finitos. Para validação do modelo, comparou-se os resultados obtidos pela simulação e os obtidos experimentalmente através de campanhas de medições com termopares instalados no corpo de prova.

Palavras-chave: Fornos industriais; Simulador de temperaturas; Transferência de calor; Curva de aquecimento.

TOOL FOR HEATING, REHEATING AND HEAT TREATMENT FURNACE CONTROL

Abstract

This article aims at presenting a tool capable of simulating and controlling the heating, reheating or treatment of elements in real time. The developed system allows to simulate the final temperature of the element, furnace cycle and soaking time for various loading situations, furnace geometry and part dimensions. Thus, there is a greater control and optimization of block heating furnaces, reheating and heat treatment of tubes, promoting increase of productivity, reduction of variability and optimization of treatment curves. This model uses a system of discretized heat transfer equations in finite control volumes. For the validation of the model, the results obtained by the simulation and those obtained experimentally through measurements campaigns with thermocouples installed in the test body were compared.

Keywords: Industrial furnaces; Temperature simulator; Heat transfer; Heating curve.

¹ Estudante de Engenharia Mecânica, Estagiária, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheira Mecânica, Doutora, HeatTreatmentProcessCommunity Manager, HeatTreatmentProcessCommunity, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor, Coordenador de Tratamento Térmico e Processos Térmicos, Tecnologia e Engenharia de Processos, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

- ⁴ *Engenheira de Controle e Automação, Bacharel, Engenheira I, Data Science e Automação, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*
- ⁵ *Engenheiro de Controle e Automação, Bacharel, Engenheiro I, Data Science e Automação, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Fornos industriais são designados ao aquecimento de materiais a elevadas temperaturas fornecendo calor a essas cargas por meio de variados modos de transferência de calor. Dessa forma, o controle desse aquecimento é de suma importância para a qualidade dos produtos e do processo.

Visando otimizar o funcionamento do forno e auxiliar a tomada de decisões, assim como o tempo de ciclo, aumentada produtividade, e reduçãoda variabilidade no processo, desenvolveu-se uma ferramenta que simula a curva de aquecimento para diferentes configurações do forno de modo a obter dois níveis de controle, um modelo preditivo e um modelo em tempo real.

O modelo preditivo, off-line, simula diversos tipos de produção a fim de se escolher os parâmetros adequados para aquecer as peças e configurar o modelo matemático do sistema. Já o segundo nível, online, calcula em tempo real as temperaturas do produto dentro do forno a partir das temperaturas do forno no instante em questão.

A ferramenta computacionalapresentada nesse trabalho é baseado em um modelo desenvolvido peloDepartamento de Térmica do Centro de Pesquisa da Vallourec da França. A partir desse modelo, tem-se o sistema capaz de controlar os fornos e sua validação foi realizada através de medições de temperatura em corpo de prova selecionado para este fim^[2].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Modelo

O modelo considera a geometria do forno e por isso deve-se inserir as informações gerais do mesmo para qual será realizado o cálculo de temperatura, sendo elas as dimensões e características das suas zonas físicas. Além disso, o modelo considera a família dos aços a serem tratados no forno uma vez que essa informação é utilizada para calcular as propriedades do aço (calor específico, condutividade térmica e densidade) e definirão os principais parâmetros de troca de calor. Essa família é definida a partir da composição química do aço.

Outro parâmetro de influência no modelo são as interações térmicasentre os elementos vizinhos, teto e soleira assim como o espaçamento entre peças, e por isso os dados relacionados a elas devem ser inseridas para a simulação.

No modelo matemático em questão, a paredeé dividida em várias camadas e a temperatura do tubo é uma média da temperatura de cada camada.

O fluxo de calor é calculado para todas as camadas de forma particular uma vez que cada volume de controle troca calor diferentemente, sendo que a camada mais externa recebe calor por radiação e convecção e perde por condução. Para as demais camadas tem-se apenas fluxo condutivo entre camadas (direção radial) e entre partes (direção angular) uma vez que o modelo considera a rotação do tubo. A última camada foi considera isolada e por isso não perde calor para a atmosfera, recebendo, apenas, calor da camada anterior.

2.2 Balanço de energia

Ao longo do comprimento do forno, têm-se termopares instalados na parte superiorresponsáveis pelo registro da temperatura da atmosfera do forno em

determinadas posições. A partir desses instrumentos, obtém-se o perfil de temperatura do forno que é base para obtenção da temperatura do teto do forno. O modelo realiza os cálculos baseando-se na posição da soleira do forno, dessa forma, esse perfil de temperatura auxilia na determinação da temperatura da atmosfera no volume de controle e na posição de análise. Essa temperatura, por sua vez, é utilizada para cálculo de balanço de energia.

Além da temperatura do teto, outra variável importante para os cálculos desse simulador é a temperatura do piso. Essa região pode ou não possuir controle de temperatura, e por isso, o modelo é capaz de estimá-la através do balanço de energia. Ademais, a cada iteração do modelo e mudança de posição, as temperaturassão atualizadas.

A respeito dos cálculos das transferências de calor existentes no forno tem-se as equações que se seguem (Equações de 1 a 10):

$$\varphi_{\text{rad, teto} \rightarrow \text{piso}} = F_{\text{tetopiso}} \cdot \varepsilon_p \cdot \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot (T_{\text{teto}}^4 - T_{\text{piso}}^4) \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{rad, tubo} \rightarrow \text{piso}} = F_{\text{tubopiso}} \cdot \varepsilon_u \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_{\text{inicial}}^4 - T_{\text{piso}}^4) \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{rad, piso} \rightarrow \text{tubo}} = F_{\text{tetotubo}} \cdot \varepsilon_u \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_{\text{piso}}^4 - T_{\text{média,p}}^4) \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{rad, teto} \rightarrow \text{tubo}} = F_{\text{tetotubo}} \cdot \varepsilon_u \cdot \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot (T_{\text{teto}}^4 - T_{\text{média}}^4) \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{conv, piso}} = h_{\text{conv,piso}} \cdot (T_{\text{teto}} - T_{\text{piso}}) \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{conv, tubo}} = h_{\text{conv,tubo}} \cdot (T_{\text{med_tubo_teto}} - T_{\text{final}}) \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{cond, piso}} = K_x \cdot (T_{\text{externo}} - T_{\text{piso}}) \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{cond, camadaexterna}} = K_x \cdot F_{c,n} \cdot (\Delta T_{\text{média,p}}) \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{cond, vizinho}} = -K_x \cdot (\Delta T_{\text{média,p}} + \Delta T_{\text{média,p+1}}) \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{cond, interna}} = K_x \cdot F_{c,n} \cdot (\Delta T_{\text{média,p}}) \quad (10)$$

Onde:

$\varphi_{\text{rad,x} \rightarrow \text{y}}$ representa o fluxo de calor por radiação entre as superfícies indicadas $\left(\frac{W}{m^2}\right)$;

$\varphi_{\text{conv,x}}$ representa o fluxo de calor por convecção para a superfície indicada $x \left(\frac{W}{m^2}\right)$;

$\varphi_{\text{cond,n}}$ representa o fluxo de calor por condução da superfície indicada $n \left(\frac{W}{m^2}\right)$;

F_{xy} é o fator de forma entre as superfícies x e y.

$F_{c,n}$ fator de forma de condução da camada n;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann;

ε_p é a emissividade do piso;

ε_t é a emissividade do teto;

ε_u é a emissividade do tubo;

K_x condutividade térmica da superfície indicada por x $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$;

$h_{\text{conv,x}}$ é o coeficiente convectivo para a superfície indicada x;

T_{teto} é a temperatura do teto na posição de análise (K);

T_{piso} é a temperatura do piso na posição de análise (K);

T_{inicial} é a temperatura da camada externa do tubo na posição de análise (K);

T_{externo} é a temperatura da superfície externa do forno (K);

$T_{\text{média,p}}$ é a média das temperaturas do elemento antes e depois na posição de análise (K);

$T_{\text{med_tubo_teto}}$ temperatura média entre teto e tudo na posição de análise (K);

T_{final} temperatura final estimada do tubo (K);

No cálculo do fator de forma, considera-se as influências do forno e das peças vizinhas. Para simplificação, o modelo considera os centros das peças alinhadas para a obtenção dos ângulos das seções do fator de forma.

Para que os fluxos de calor atuantes no tubo sejam calculados, o modelo realiza cálculos iterativos a fim de se obter todas as temperaturas necessárias para os cálculos térmicos. Como citado, a temperatura do teto é obtida pelos termopares físicos, já a temperatura do piso deve ser estimada caso não haja essa forma de medição. Para tal, o balanço de energia é executado e seu erro deve ser aproximadamente 0 (zero).

Abaixo se encontram os balanços térmicos necessários para o cálculo da temperatura estimada do tubo em cada camada.

Piso:

$$\varphi_{\text{rad, teto} \rightarrow \text{piso}} + \varphi_{\text{rad, tubo} \rightarrow \text{piso}} + \varphi_{\text{conv, piso}} + \varphi_{\text{cond, piso}} \cong 0 \quad (11)$$

Camada 1

$$\varphi_{\text{rad, teto} \rightarrow \text{tubo}} + \varphi_{\text{rad, piso} \rightarrow \text{tubo}} + \varphi_{\text{conv, piso}} - \varphi_{\text{cond, n+1}} + \varphi_{\text{cond, vizinho}} = m \cdot C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (12)$$

Camada 2 a n-1

$$\varphi_{\text{cond, n-1}} - \varphi_{\text{cond, n+1}} = m \cdot C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (13)$$

Camada n

$$\varphi_{\text{cond, n-1}} = m \cdot C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (14)$$

Onde: m é a massa de cada camada do tubo; C_p é o calor específico do aço; $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ é taxa de variação da temperatura no intervalo de tempo entre iterações do modelo. Esse intervalo foi determinado a partir do critério de estabilidade.

2.3 Métodos numéricos

Após a execução das equações anteriores, o modelo calcula a temperatura dos elementos do tubo. Para essa temperatura, tem-se a verificação da precisão estipulada. O cálculo do erro está em função da temperatura média do tubo, ou seja, a diferença absoluta entre a temperatura média atual e a média anterior deve atender precisão pré-definida (Equação 15):

$$|T_{\text{médiaAtual}} - T_{\text{médiaAnterior}}| < E \quad (15)$$

Esse modelo considera a temperatura válida se o erro (E) for menor que 0,1°C. Caso esse critério seja atingido, a temperatura inicial do tubo para a próxima iteração é atualizada com o valor da temperatura recém calculada de acordo com técnica das substituições sucessivas^[3].

2.4 Campanha de medição

Inicialmente, a partir dos dados inseridos na configuração do modelo as iterações são realizadas e obtém-se uma curva padrão que é mostrada na tela do modelo. A fim de se validar e ajustar essa curva, medições experimentais foram realizadas no forno da usina e foi feita a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os simulados.

No forno, há instalações de termopares em determinadas posições que oferecerão informações sobre as temperaturas das zonas e traçarão o perfil térmico do forno ao longo do tempo.

Quanto ao corpo de prova, termopares foram instalados em certas profundidades na parede do tubo e em diversas posições ao longo do comprimento (Figura 1). As temperaturas desses termopares são registradas em um coletor de dados, o *logger*. Para essa campanha, utilizou-se intervalos de 10 segundos.

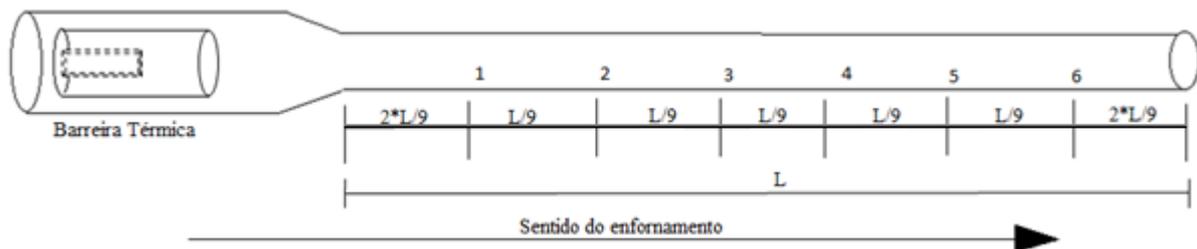


Figura 1. Corpo de prova e localização dos termopares.

Anexado ao corpo de prova, encontra-se um dispositivo, denominado barreira térmica, que é composta por um isolante térmico, água e o coletor de dados que é inserido no interior dessa barreira. Esse dispositivo entra no forno junto com a peça e o fluido é utilizado como parâmetro de segurança uma vez que garante que a temperatura do coletor de dados não ultrapasse a $100^{\circ}\text{C}^{[4]}$ enquanto houver água no reservatório.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de temperatura simulado e o obtido experimentalmente durante o aquecimento do tubo no forno pode ser visto na figura (Figura 2) abaixo. Esse perfil representa a temperatura média dos termopares (1 a 6) e a média da simulação. Para a simulação, valores como a temperatura de enforamento, dimensões do tubo e temperaturas das zonas de pré aquecimento, aquecimento e encharque foram inseridas. O valor inicial do aquecimento corresponde ao valor real pelo qual o tubo foi enforado.

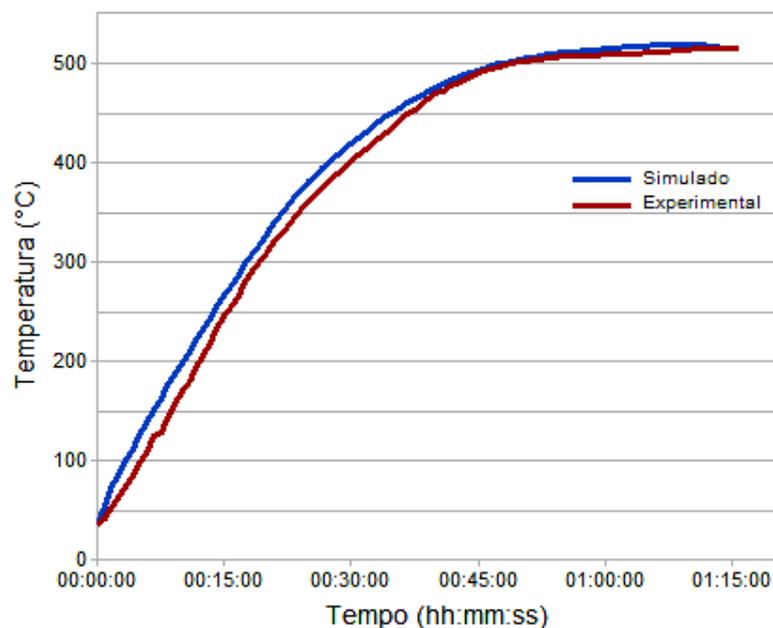


Figura 2. Comparação dos perfis de temperatura durante o aquecimento

Dentro do código do programa, há constantes que são ajustadas para que a curva padrão possua a mesma inclinação e característica que uma curva real. É a partir dessa curva que o modelo realiza os cálculos da temperatura do tubo. Sendo assim, a curva em azul representada na figura 2, é essa curva padrão já com os devidos ajustes de configuração.

Os valores da temperatura no intervalo de 15 minutos da simulação e experimental estão explicitados na tabela (Tabela 1):

Tabela 1. Valores das temperaturas experimentais e simuladas

	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	75 min
Experimental (°C)	35	245,8	401,15	491,2	509,3	516,5
Simulado (°C)	35	265,9	419,8	493,6	515,	515,8

As temperaturas no instante 0 min são iguais pois é um dado de entrada do modelo.

O erro relativo encontrado entre os valores experimentais e simulados foi calculado de acordo com a equação 16:

$$Erro = \frac{T_{real} - T_{simulado}}{T_{real}} * 100 \quad (16)$$

A tabela abaixo (Tabela 2) apresenta os valores dos erros calculados para o intervalo de tempo em questão:

Tabela 2. Erros relativos calculados para os instantes mostrados

	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	75 min
Erro relativo (%)	0	8,2	4,6	0,5	1,2	0,1

A partir dos erros encontrados em toda a curva, tem-se o erro relativo médio que é de aproximadamente 6,4%.

Para uma análise de correlação entre os valores., os dados foram plotados em um gráfico de dispersão (Figura 3). Para esses dados, a correlação de Pearson foi obtida e o valor é de 0,999. Sabendo-se que o valor de Pearson varia entre -1 a 1, sendo 1 a indicação de uma relação positiva, podemos concluir que a ferramenta de simulação apresenta boa previsão do perfil de temperatura do tubo.

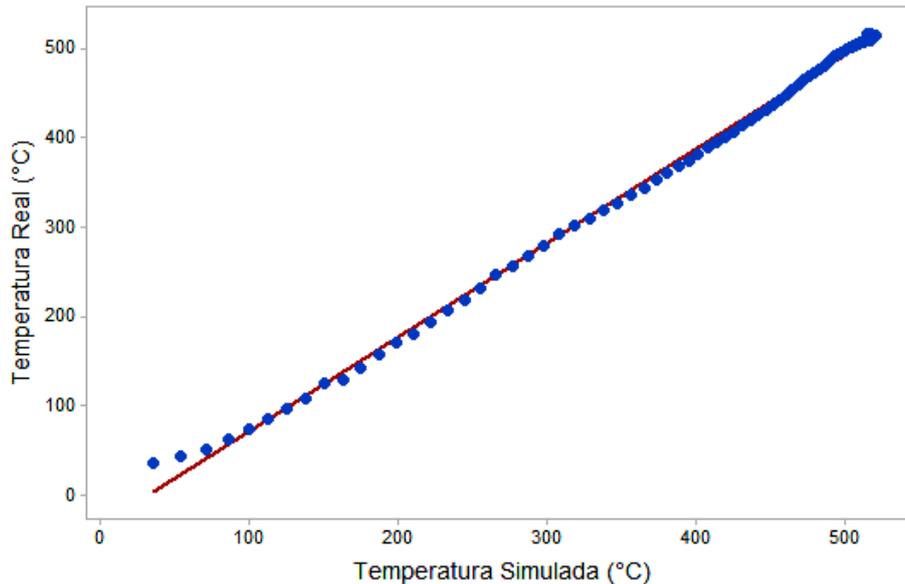


Figura 3. Diagrama de dispersão das temperaturas

4 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se observar que o modelo apresentou erro médio relativo de 6,4%. Esse valor obtido indica uma boa precisão do modelo e de maneira geral pode-se concluir que essa ferramenta computacional apresenta boa confiabilidade e aptidão para ser utilizada em escala industrial. Além do erro médio relativo, tem-se também o valor de Pearson que indicou uma relação positiva o que reafirma a precisão do modelo.

Em outras palavras, o modelo apresentado permite analisar o aquecimento do tubo/bloco, controlar e auxiliar na tomada de decisões no que diz respeito às mudanças de setup do forno. A partir dessa ferramenta, os resultados referentes à qualidade da peça e do processo podem alcançar maior otimização e melhores respostas. Ademais, com um melhor controle do processo obtem-se aumento de produtividade, em resposta à diminuição do retrabalho, redução de variabilidade e otimização das curvas de tratamento.

Agradecimentos

À Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A., pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 Incropera FP, Dewitt DP. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6.ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos, Editora S. A.;2008.

- 2 Silva RJ, Carvalho FL, Souza MJ, Lopes VM, Nascente AR. Sistema baseado em modelo matemático para controle de temperatura de tubos nos fornos da linha de têmpera e revenimento da V&M do Brasil. In: XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades Industriais, 2006, Porto Alegre – RS. ABM q. v.CD
- 3 Chapra, SC, Applied Numerical Methods With MATLAB, 3.ed. Rio de Janeiro: MC Graw Hill, 2004, 384p.
- 4 Silva PCS, Heubner R, Silva RJ, Soares LN. Mathematical model and analysis of thermal protection apparatus. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering; 2013; Ribeirão Preto. COBEM; 2013.