

# SISTEMA BASEADO EM MODELO MATEMÁTICO PARA CONTROLE DE TEMPERATURA DE TUBOS NOS FORNOS DA LINHA DE TÊMPERA E REVENIMENTO DA V&M DO BRASIL<sup>1</sup>

*Ricardo Junqueira Silva<sup>2</sup>  
Felipe Leal Carvalho<sup>3</sup>  
Marcelo Jardim de Souza<sup>4</sup>  
Vladimir Miranda Lopes<sup>5</sup>  
Anderson Reis Nascente<sup>6</sup>*

## **Resumo**

Foi desenvolvido um modelo determinístico de simulação do aquecimento dos tubos. Esse modelo foi validado através da medição de temperatura em tubos especialmente preparados para a aquisição de dados durante o aquecimento dentro dos fornos. Posteriormente, foi desenvolvido um aplicativo em C#.NET integrado aos sistemas de controle dos fornos e rastreamento da linha, que calcula a curva de aquecimento em tempo real e determina a cada instante as temperaturas de referência dos controladores de cada zona dos fornos.

**Palavras-chave:** Modelo matemático; Controle de processo; Tratamento térmico.

## **MATHEMATICAL MODEL BASED SYSTEM FOR PIPES TEMPERATURE CONTROL ON FURNACES OF QUENCH AND TEMPERING LINE FROM V&M do BRASIL**

## **Abstract**

It was developed a deterministic simulation model for pipes heating. This model was validated through temperature measurement along the treatment on pipes prepared for the data acquisition on the furnaces. It was also developed an application in C#.NET, integrated to the furnaces control system and line material tracking system, that calculates the heating curve in real time and determines the control reference temperatures for each furnace zone.

**Key words:** Mathematical model; Process control; Heat treatment

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Porto Alegre, RS, 16 a 18 de agosto de 2006.*

<sup>2</sup> *Doutor em Engenharia Mecânica, Gerência de Energia e Utilidades, V&M do BRASIL S.A.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, Gerência de Ajustagem da Laminação Automática, V&M do BRASIL S.A.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Eletricista, Gerência de Manutenção da Laminação Automática, V&M do BRASIL S.A.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, IHM Engenharia e Sistemas de Automação Ltda.*

<sup>6</sup> *Engenheiro Eletricista, IHM Engenharia e Sistemas de Automação Ltda.*

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o sistema desenvolvido para o controle de temperatura dos fornos de austenitização e revenimento da linha de tratamento térmico da Laminação Automática da V&M do Brasil. O sistema foi batizado de SOFIA – Sistema de Otimização de Fornos Integrado aos Sistemas de Automação.

De acordo com as suas aplicações industriais, os aços são submetidos a tratamentos térmicos para ajustar suas propriedades mecânicas. O principal equipamento utilizado em tratamento térmico são fornos de aquecimento, que podem ser classificados de acordo com seus aspectos construtivos e/ou sua aplicação.

A linha de tratamentos térmicos da VMB se caracteriza por realizar o tratamento de têmpera e revenimento. Na primeira etapa do tratamento, os tubos são aquecidos acima da temperatura de austenitização ( $\sim 900^{\circ}\text{C}$  dependendo da composição química do aço) e mantida nesta temperatura durante um período de tempo para homogeneização, chamado encharque. A temperatura final e homogeneidade de temperatura durante esta etapa são importantes para garantir uma homogeneidade na estrutura do material.

Na segunda etapa do tratamento os tubos são resfriados em uma elevada taxa, suficiente para formar uma estrutura homogênea chamada martensita. Essa etapa é chamada de têmpera.

Os tubos seguem então para a terceira e última etapa do tratamento, que chamamos de revenimento. Os tubos são novamente aquecidos em fornos em uma temperatura abaixo da temperatura de transformação ( $\sim 727^{\circ}\text{C}$  dependendo da composição química do tubo) e mantidos nesta temperatura durante um tempo de encharque. A temperatura final, a homogeneidade de temperatura e o tempo de encharque durante esta etapa são extremamente importantes pois determinarão a propriedade final do material.

Nos fornos de soleira caminhante como os instalados nessa linha, a movimentação do material é feita através de vigas móveis que elevam as peças movendo-as até novas posições nas vigas fixas. O material fica apoiado nas vigas fixas até a próxima movimentação das vigas móveis. Esta característica permite uma grande gama de operações como, por exemplo, o espaçamento variado entre material enforado.

O uso de modelamento matemático para simulação e controle de processos de aquecimento é bastante utilizado pela indústria em todo mundo. Destacamos os trabalhos de Leden, Lidholm e Nitteberg<sup>(1)</sup> que desenvolveram um modelo de controle que chamaram de STEELTEMP<sup>®</sup> para controle do processo de aquecimento e é utilizado em fornos de diversas empresas suecas (por exemplo na Uddeholm Tooling AB e SSAB Oxelösund AB). Honner, Vesely, e Svantner<sup>(2)</sup> aplicaram o método estocástico Exodus no desenvolvimento de um sistema de controle e o aplicam a forno empurrador de barras quadradas. Os autores afirmam que há uma grande redução de esforço computacional quando comparado com modelos determinísticos.

Não foram encontradas referências da utilização de sistemas de controle de temperatura como o desenvolvido aplicado a fornos de tratamento térmico. Foi desenvolvido um modelo determinístico de simulação do aquecimento dos tubos nos fornos. Esse modelo foi validado através da medição de temperatura durante a passagem dos tubos pelos fornos. Foi desenvolvido um aplicativo integrado aos sistemas de controle dos fornos e rastreamento da linha, que calcula a curva de

aquecimento em tempo real e determina a cada instante as temperaturas de referência dos controladores.

## 2 DESCRIÇÃO DA LINHA DE TÊMPERA E REVENIMENTO

A linha de tratamento térmico é composta de dois fornos de soleira caminhante, um dispositivo de resfriamento para realizar o tratamento de têmpera, uma máquina de desempenho a quente, além de linhas de rolos, mesas de transferência e leito de resfriamento. Todos os equipamentos vieram da linha tratamento térmico de Clydesdale na Escócia em 2001 e foram reconicionados no Brasil. A linha é equipada também com serras, bancas de inspeção visual e dimensional, inspeção magnética para extremidades dos tubos, inspeção com ultra-som e um equipamento para medir o diâmetro externo e a ovalização ao longo dos tubos. Os dados dos fornos estão na Tabela 1 e o fluxo de produção é apresentado na Figura 1.

Tabela 1. Dados do fornos.

	Austenitização	Revenimento
Número de posições	13	21
Número de zonas	8	
Combustível	Gás natural	
Diâmetro externo dos tubos (mm)	88,9 a 365	
Comprimento dos tubos (m)	6,2 a 14,3	
Temperatura de trabalho (°C)	800 a 1050	550 a 730

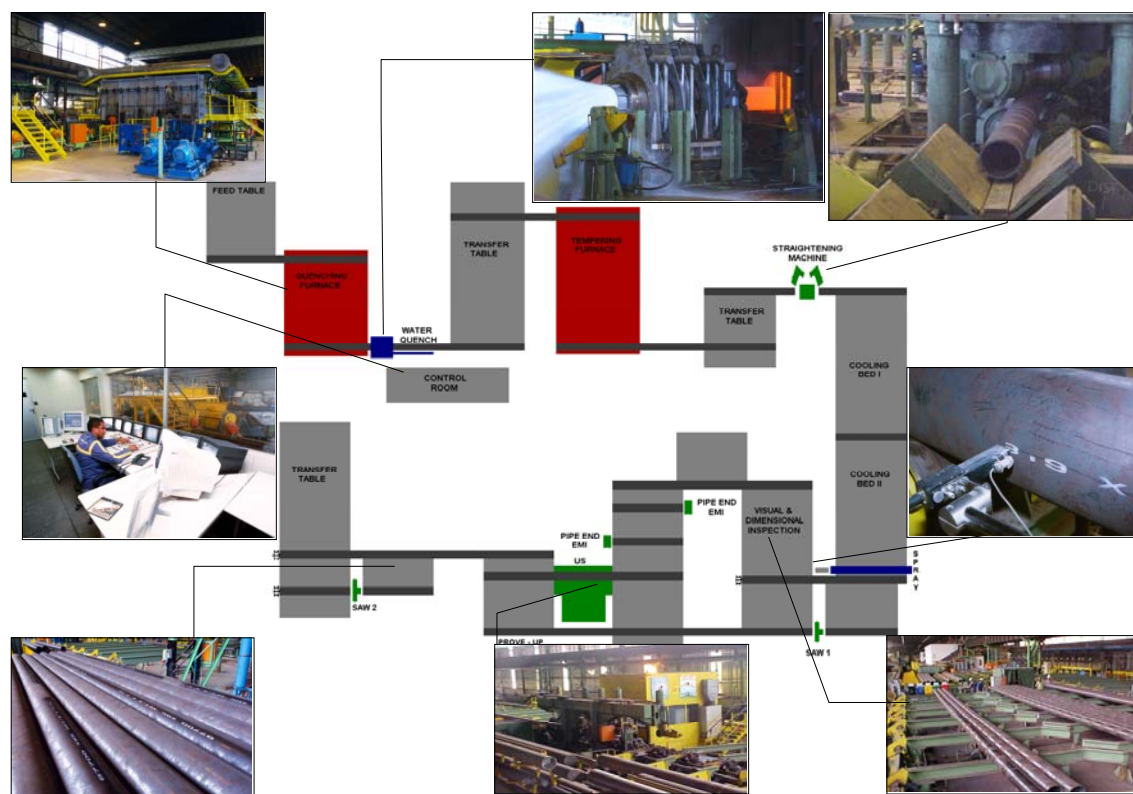


Figura 1. Fluxo de produção da linha.

### 3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

#### 3.1 Desenvolvimento do SOFIA

No início de produção da linha de tratamento térmico no Brasil, em 2001, foi desenvolvido um modelo de simulação dos fornos para definição de seus parâmetros de operação. O desenvolvimento das funcionalidades para controle do processo foi uma evolução natural. Foi desenvolvido um aplicativo em que foram incorporados os modos de simulação e controle, cujas interfaces podem ser vistas na Figura 2.

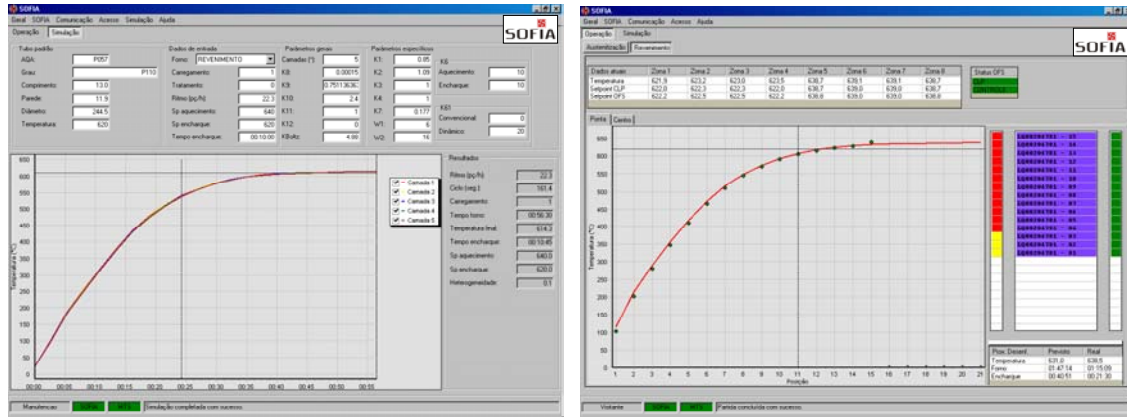


Figura 2. Interfaces do SOFIA nos modos simulação e controle.

#### 3.2 Modelo Térmico

O modelo térmico do SOFIA é baseado em um modelo desenvolvido pelo Departamento de Térmica do Centro de Pesquisa da Vallourec da França. Consiste basicamente de um balanço térmico aplicado em uma fatia radial do tubo, o que significa que a energia líquida entrando na fatia é responsável por seu aumento da temperatura,<sup>(3)</sup> ou seja:

$$Q_{liq} = m \cdot c_p \cdot DT \tag{1}$$

O modelo divide a espessura de parede do tubo em cinco fatias radiais e calcula a temperatura em cada uma (Figura 3).

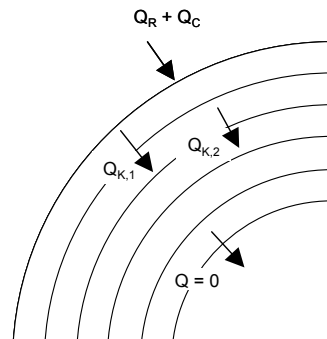


Figura 3. Balanço de energia no tubo.

A fatia externa recebe o calor por radiação ( $Q_R$ ) e convecção ( $Q_C$ ) do forno e transfere às outras fatias por condução ( $Q_K$ ). A transferência de calor do forno é calculada com base na temperatura real e na posição do tubo no mesmo. Esses

valores são levantados com base em experimentos de medição da temperatura do tubo e da atmosfera do forno com termopares. O modelo é ajustado frequentemente para diferentes materiais do tubo, suas dimensões e condições de tratamento (tempo e temperatura do forno).

A face interna do tubo é considerada termicamente isolada. Para se considerar o efeito de ponta nas extremidades do tubo o modelo tem constantes de ajuste diferentes para estas áreas.

As propriedades dos materiais ( $r$ ,  $c_p$ ,  $k$  e emissividades) são consideradas variáveis com a temperatura e seus valores foram obtidos pelo Centro de Pesquisa da Vallourec.

### 3.3 Fluxo de Informação

O SOFIA compreende de um aplicativo Servidor, instalado em um dos servidores do Sistema de Rastreamento (MTS – Material Tracking System), e do aplicativo Cliente instaladas em computadores da operação e da manutenção. Comunica-se com o MTS e os Controladores Lógico Programáveis (PLC) dos fornos de Austenitização e Revenimento. A Figura 4 mostra os fluxos de informação entre sistemas de informação envolvidos (SAP, MES, MTS, PLC e SOFIA). Cada item numerado corresponde a uma seta numerada na Figura 4.

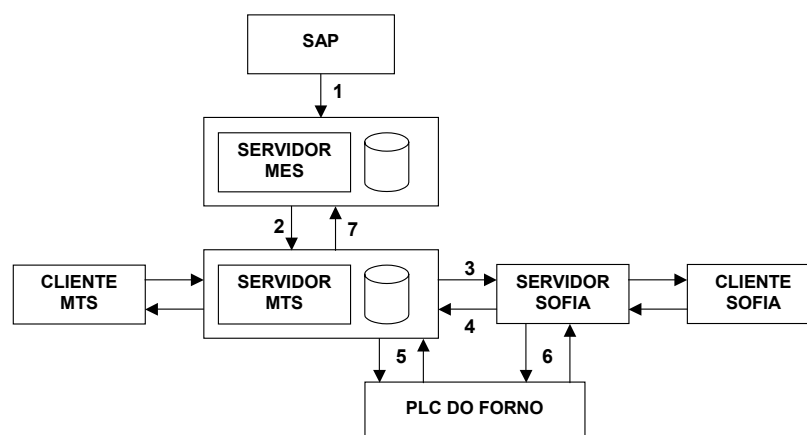


Figura 4. Fluxo de informação.

1. O operador lança no sistema (SAP) a próxima ordem a ser produzida. Todos os dados a respeito desta ordem do tratamento são enviados para o MES (Manufacturing Execution Systems).
2. O MES envia ao MTS o número da ordem, temperatura desejada do tubo, tempo de encharque desejado, tipo de tratamento (convencional ou dinâmico), ciclo do forno e temperatura das zonas dos fornos.
3. Os dados da ordem são enviados ao SOFIA pelo MTS. Durante a produção desta ordem o MTS envia alguns eventos ao SOFIA, como movimento da soleira, carregamento e descarregamento de tubos. Os mapas com as posições dos tubos dentro dos fornos são enviados também para comparação. No caso de os mapas no MTS e no SOFIA não coincidirem, o sistema é desabilitado automaticamente.
4. O SOFIA calcula a curva de aquecimento para este tubo e envia ao MTS o setup inicial dos fornos, isto é, ciclo sugerido, temperatura das zonas de aquecimento e

- encharque e temperatura objetivada para o tubo em cada posição dentro dos fornos.
5. O operador verifica o setup e envia, via MTS, os parâmetros iniciais até o PLC do forno. Assim que as temperaturas do forno forem alcançadas é iniciado o carregamento dos tubos.
  6. Quando o primeiro tubo é carregado o SOFIA começa controlar as temperaturas de todas as zonas do forno. O SOFIA calcula repetidamente as temperaturas e envia ao MTS as seguintes informações: tempo, a temperatura calculada, a temperatura objetivada e também o status do tubo para temperatura e tempo de encharque. Os cálculos são realizados a cada 30 s e também quando um tubo é carregado, descarregado ou quando as vigas se movem. O SOFIA detecta automaticamente as variações de ritmo e/ou interrupção da linha e recalcula as temperaturas das zonas de controle com base nessa informação.
  7. Ao final do tratamento de cada tubo, o MTS envia os dados de processo ao MES e estes dados estão disponíveis para serem consultados.

## 4 RESULTADOS

A utilização contínua do SOFIA proporcionou ganhos de produtividade e economia de combustível sem nenhum impacto negativo na qualidade dos produtos tratados.

### 4.1 Tratamento dinâmico

A tratamento dinâmico consiste em se utilizar uma temperatura nas zonas de aquecimento maior que a temperatura de tratamento do material (máximo 50°C). O risco da sua utilização é o aquecimento acima da temperatura de tratamento dos tubos durante o processo no caso de uma parada da linha. Após a implementação do SOFIA foi possível a utilização, já que a temperatura dos fornos é automaticamente reduzida nas paradas. A Tabela 2 mostra o aumento da produtividade para dois dos principais produtos da tratados na linha.

**Tabela 2.** Aumento de produtividade.

	Diâmetro (mm)	Parede (mm)	Ciclo (s)		Produtividade (peças / hora)		Aumento de produtividade (%)
			Antes	Depois	Antes	Depois	
P110	244,5	11,99	174	155	20,40	23,22	12,2
P110	244,5	13,84	193	176	18,65	20,45	9,7

### 4.2 Redução de Setup

Antes da implementação do SOFIA sempre que o ciclo ou a temperatura das zonas mudava de um lote ao seguinte, o forno de revenimento era esvaziado para a adequação das suas condições de operação. Com a implantação do SOFIA as regras para o setup foram mudadas já que o sistema controla o forno considerando o mix de produtos em seu interior e faz a transição suave de uma condição de operação à outra. As novas regras para o setup estão resumidas no fluxograma da Figura 5.

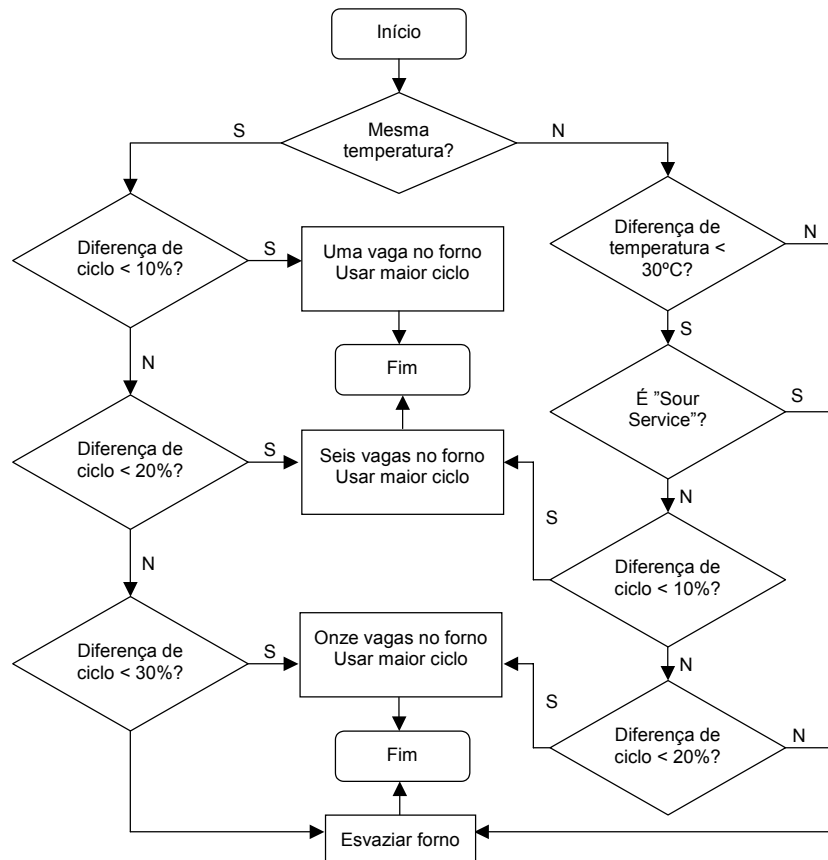


Figura 5. Fluxo de setup.

O ganho de produção é obtido porque é reduzido o número de vagas nos fornos durante o setup. O tempo médio de setup era de 62 minutos antes da implementação e foi reduzido para 44 minutos, gerando um ganho de produção de 600 min/mês.

#### 4.3 Redução de consumo

Foi observada uma redução no consumo de combustível no forno de austenitização mas não no forno de revenimento. Isso ocorreu porque esse forno trabalha a temperaturas mais elevadas, com maiores perdas de energia, e operava com tempo de encharque maior que o necessário. Enquanto a produtividade aumentou, o consumo específico do gás (Nm<sup>3</sup>/ton) diminuiu 7,5%.

## 5 CONCLUSÕES

A adaptação do modelo determinístico de simulação desenvolvido no início da operação da linha de tratamento térmico no Brasil para um modelo de controle foi realizada com sucesso. O sistema batizado de SOFIA é utilizado continuamente na linha.

A implantação do SOFIA proporcionou resultados significativos. Destacam-se o ganho de produção com a utilização do tratamento dinâmico, a redução do tempo de setup e a redução do consumo de combustível no forno de austenitização.

Alem disso proporcionou maior comodidade à operação reduzindo as intervenções dos operadores no sistema de controle para corrigir desvios na temperatura dos tubos.

## REFERÊNCIAS

- 1 LEDEN, B.; LIDHOLM, D.; NITTEBERG, E. The use of STEELTEMP® software in heating control. **La Revue de Métallurgie: Cahiers D'Informations Techniques**, p.367-380, Mars 1999.
- 2 HONNER, M., VESELY, Z., SVANTNER, M. Exodus stochastic method application in the continuous reheating furnace control system. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.33, n.6, p.328-337, December 2004.
- 3 INCROPERA, F. P e DeWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. São Paulo: Guanabara Koogan, 1990, 455 p.