

# UTILIZAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO NOS FORNOS DE REAQUECIMENTO DE PLACAS DA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE DA ACESITA <sup>1</sup>

*Benjamin Fullin Júnior*<sup>2</sup>  
*Carlos Roberto Gonçalves*<sup>3</sup>  
*Luciano Lellis Miranda*<sup>4</sup>  
*Luiz Alberto de Oliveira Martins*<sup>5</sup>

## Resumo

No ano de 2000 a ACESITA adquiriu um novo forno Walking Beam (WB2), constituindo este, o terceiro forno da laminação de tiras a quente (LTQ). Um sistema de automação dedicado à área de Fornos da LTQ foi desenvolvido para gerenciamento dos três fornos a saber: forno Walking Beam 1 (WB1), forno Walking Beam 2 (WB2) e forno Pusher. O sistema de automação inclui funções como: gerenciamento de programas de produção, rastreamento de placas e um Sistema de Otimização (SO) que possui um Modelo Térmico de Reaquecimento de Placas para os fornos. As principais funções deste Modelo são: o rastreamento térmico das placas, o cálculo das curvas de aquecimento de cada produto, o cálculo de set points de temperaturas os fornos e controle do ritmo de produção dos mesmos. Com a utilização do SO tornou-se possível o controle automático do processo de reaquecimento de placas O Modelo Térmico desenvolvido pela Stein Heurtey (fabricante do forno WB2), foi adaptado para as várias condições de processo e de produção da ACESITA, onde alterações específicas foram desenvolvidas através da participação das equipes de Controle de Processo e Automação. A utilização do Sistema de Otimização permitiu alcançar resultados como: maior conhecimento e domínio do processo de reaquecimento de placas; gerenciamento de temperaturas e transições nos fornos, garantindo características específicas do processo ACESITA; aumento de produtividade dos aços inoxidáveis e carbono; redução de temperaturas de processo, com ganhos conseqüentes em consumo de combustível e redução de formação de carepa.

**Palavras-chave:** Forno Walking Beam; Automação; Sistema de otimização (SO).

<sup>1</sup> *Contribuição Técnica ao IX Seminário de Automação de Processos, 05 a 07 de Outubro de 2005, – Curitiba – PR.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica (Calor e Fluidos) – Gerente da Área de Fornos da LTQ da ACESITA S.A.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Eletricista – Assistente Técnico da Gerencia de Automação e Eletrônica o da ACESITA S.A.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista – Assistente Técnico de Processo na Gerência Técnica da LTQ da ACESITA S.A.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Eletricista – Assistente Técnico da Gerencia de Automação e Eletrônica o da ACESITA S.A.*

# 1 INTRODUÇÃO

O objetivo do Sistema de Otimização dos fornos da LTQ é gerenciar o processo de reaquecimento de placas dos fornos.

A LTQ possui três fornos com características distintas entre si e processa diferentes tipos de aços especiais nas mais variadas condições de processo. Muitos destes aços exigem “cuidados especiais” durante a fase de reaquecimento de placas, de forma a garantir entre outras coisas a qualidade metalúrgica dos produtos, dentro de faixas estreitas de tolerância.

Este trabalho descreve o Sistema de Otimização (SO) dos Fornos da LTQ da ACESITA, mostrando suas funcionalidades principais e atuação da equipe da ACESITA na viabilização do desenvolvimento e implantação do mesmo. E os resultados obtidos com o desenvolvimento do Sistema de Otimização.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Configuração do Sistema de Automação

A arquitetura do Sistema de Automação da área dos fornos da LTQ é composta por um sistema de controle de manuseio de placas, sistema de controle de combustão dos fornos, sistema supervisor e um Sistema de Otimização (nível 2). Os sistemas estão conectados em rede em uma arquitetura distribuída de cliente-servidor, conforme mostrado na Figura 1. O Sistema de Automação é composto de:

- Controladores lógicos programáveis para o manuseio de placas.
- Controladores lógicos programáveis para o controle de combustão dos fornos.
- Computadores para a operação e supervisão dos fornos.
- Computadores para a manutenção do sistema.
- Computador de Nível 2 que contém o Sistema de Otimização dos Fornos (modelo matemático).

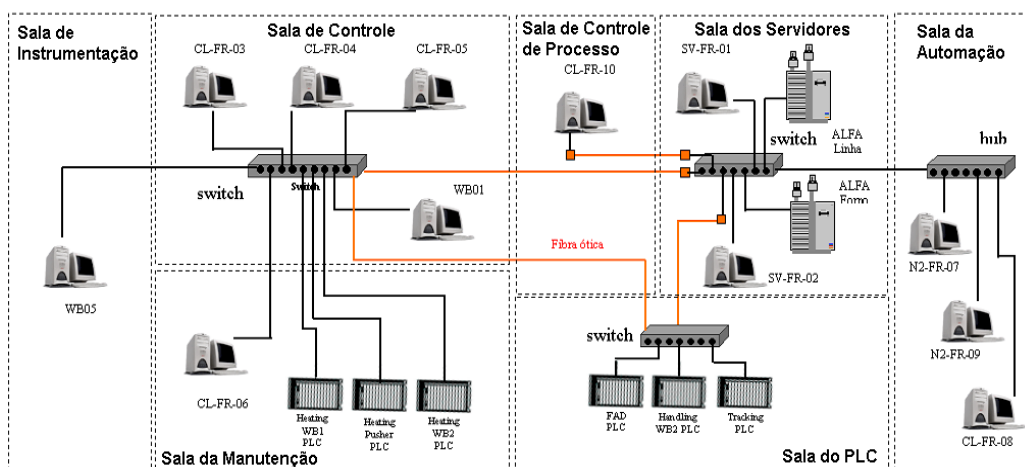


Figura 1. Arquitetura do sistema de automação dos fornos da LTQ.

## 2.2 Descrição das Principais Funções do Sistema de Otimização

As principais funções (tarefas) do SO são:

- Rastreamento Térmico das Placas, ou função THE;
- Controle Automático de Temperaturas do Forno, ou função CTL;
- Controle Automático da Cadência de Produção, ou função ACT;
- Controle da Demanda Térmica do Forno, ou função HDC;
- Controle do Comprimento de Chama, ou função FLM.

### Rastreamento térmico das placas (THE)

O “Rastreamento Térmico” consiste no acompanhamento da evolução das temperaturas das placas ao longo do forno. A curva real de aquecimento de cada placa é disponibilizada em tempo real para a operação e para análise e estudos futuros. Antes desta ferramenta a curva de aquecimento das placas era estimada através de um Modelo Térmico de simulação “off-line” (disponível para os fornos WB1 e Pusher), utilizando dados médios de temperaturas e tempos de forno. Portanto, antes do SO não era possível conhecer as diferenças entre uma placa e outra durante o aquecimento; uma curva teórica média era conhecida através de simulações “off-line”. A Figura 2 mostra um diagrama térmico para o forno WB2.

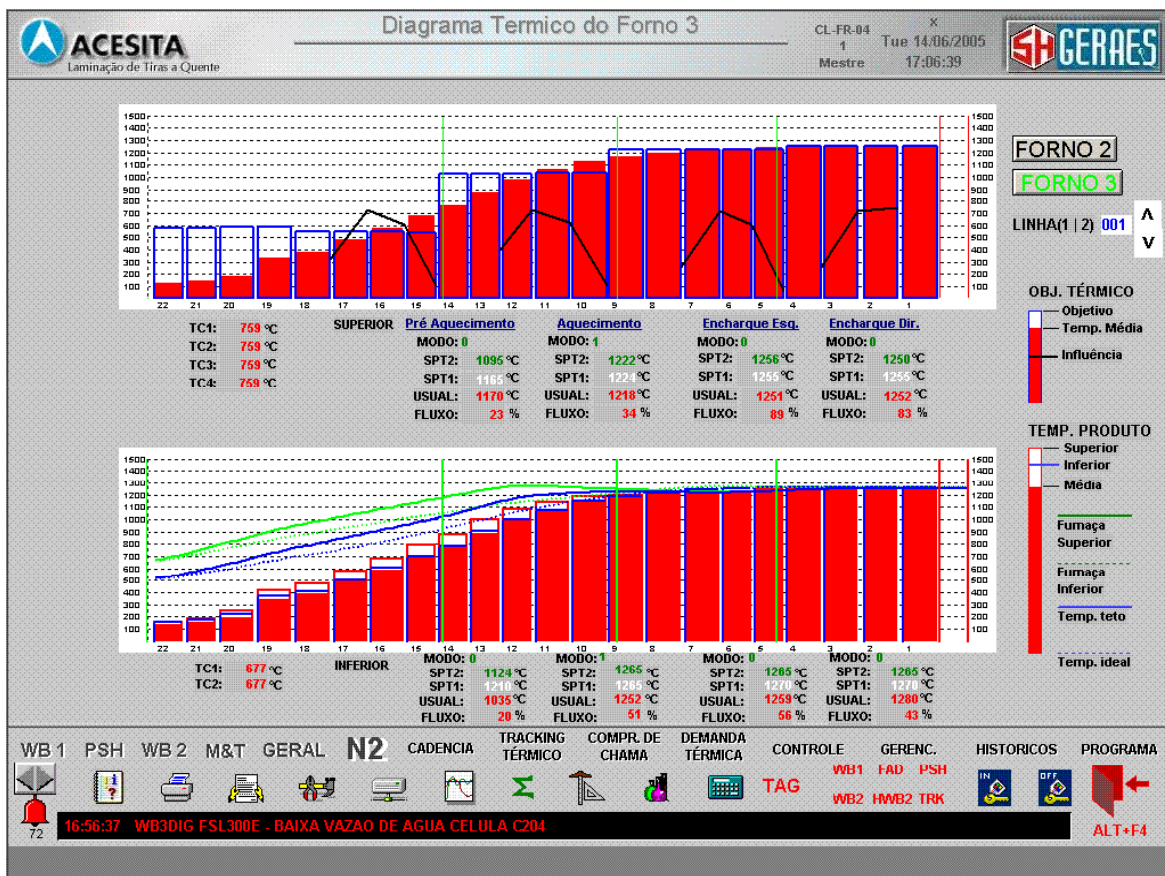


Figura 2. Diagrama térmico do forno WB2.

## Controle automático de temperaturas do forno (CTL)

Sempre que uma placa é enfiada é calculado o “objetivo de final de zona”, ou seja, as temperaturas que as placas devem atingir ao chegar ao final de cada zona do forno. Com base nestes objetivos e nos tempos de permanência das placas periodicamente as temperaturas das zonas são calculadas e aplicadas ao sistema de controle. Estas temperaturas levam em consideração variações nos objetivos de temperaturas e nos tempos de permanência das placas, corrigidos pelos atrasos acumulados. Uma grande vantagem do SO é a compensação dos atrasos acumulados ao longo do processamento das placas no forno. Sem este controle, ocorre um sobreaquecimento das placas. Uma outra vantagem é o gerenciamento de paradas de linha, quando são feitos abaixamentos e elevações automáticas das temperaturas do forno, de acordo com a duração das mesmas. Sem este controle os procedimentos manuais precisariam estar bem ajustados a fim de evitar temperaturas excessivas durante as paradas, bem como temperaturas insuficientes ao final das mesmas. Porém, o ajuste destes procedimentos é demorado e exige muita observação. Através do controle automático apenas os parâmetros relacionados às rampas (velocidades) de abaixamento e elevação de temperaturas precisam ser ajustados. Isto torna o ajuste bem mais rápido e simples de ser feito. Existe ainda a vantagem de que estes parâmetros atuam sobre os objetivos de temperatura das placas e não mais sobre as temperaturas de forno. Após algum tempo de utilização da CTL, seus resultados foram comparados com os padrões manuais. Esta comparação revelou que as curvas de aquecimentos utilizadas eram menos econômicas e muito conservadoras, pois as temperaturas de forno previstas eram bem maiores do que as necessárias para atingir as temperaturas objetivadas das placas. Após esta análise os padrões manuais foram corrigidos sem prejuízo para as condições de desenformamento das placas.

Outro benefício obtido pelo uso da CTL foi uma redução das variações das temperaturas de desenformamento, e conseqüentemente das temperaturas controladas nos laminadores. Em outras palavras, o processo ficou mais estável do ponto de vista de temperaturas, o que também contribuiu para uma menor instabilidade da laminação. Com a utilização do SO as temperaturas de desenformamento e as uniformidades de temperaturas de placas apresentaram menor variação ao longo das campanhas. A Tabela 1 mostra um quadro comparativo das temperaturas de desenformamento antes e depois do uso do SO.

**Tabela 1.** Padrões de temperaturas das zonas superiores do forno antes e após utilização do Modelo Térmico.

Tipos de aços	Temperaturas das zonas superiores					
	Padrões anteriores			Padrões após utilização do Modelo		
	Pré-aquecimento	Aquecimento	Encharque	Pré-aquecimento	Aquecimento	Encharque
Inoxidável Austenítico P3XX	1220	1270	1270	1210	1260	1260
Inoxidável Ferrítico P409	1105	1175	1160	1105	1160	1160
Inoxidável Martensítico P420	1200	1265	1265	1200	1245	1245
Inoxidável Ferrítico P430A	1155	1215	1195	1135	1200	1195
Inoxidável Ferrítico P430E	1105	1175	1165	1105	1160	1160
Silício GNO P920 / P924	1050	1120	1105	1030	1105	1100

## **Controle automático da cadência de produção (ACT)**

O intervalo de desenformamento das placas pode ser controlado utilizando-se valores fixos (padronizados) ou automaticamente através da ACT. No primeiro caso, a produtividade do forno (e conseqüentemente da linha) não é otimizada em função das variações dinâmicas de tempos de laminação, programação da produção, geometria das placas e transições de produtos. No segundo caso, o SO considera todas as condições citadas anteriormente, ajustando dinamicamente o intervalo de desenformamento e o tempo de movimentação da soleira. Dessa forma a produtividade da linha é aumentada garantindo-se as condições de desenformamento das placas nos padrões técnicos desejados. Este controle é de extrema importância quando o laminador possui altas produtividades e o forno se tornar o equipamento “gargalo” da linha. Nesta condição o forno deve ser explorado em sua produtividade máxima sem, contudo perder a qualidade de aquecimento da placas e nem suas condições de controle operacionais. Isto só é obtido com garantia pelo uso da ACT. A utilização deste controle foi especialmente importante para os aços carbono, que apresenta uma variedade de condições (comprimentos de placas variados, produtividades do laminador variadas). Normalmente estas várias variações são colocadas em uma mesma carga no forno, impossibilitando o uso de padrões manuais que maximizassem os ganhos.

## **Controle da demanda térmica do forno (HDC)**

Algumas das características da LTQ da ACESITA são: a grande variedade de aços e as condições diferentes (temperaturas de desenformamento, produtividades, etc.) em que as placas são processadas em um mesmo forno. Além disso, a mudança de uma condição para outra ocorre com uma frequência elevada. Cada uma destas condições gera uma demanda térmica diferente no forno e, conseqüentemente, exige de forma diferenciada o sistema de controle de temperatura. Não existe um ajuste único dos parâmetros do sistema de controle que seja ótimo para todas as diferentes condições de processo no forno. Uma das ferramentas do SO é a sintonia automática da malha de controle de temperatura. Conhecendo-se as condições atuais e futuras de demanda térmica do forno, os parâmetros do controlador PID são otimizados para aumentar a resposta às solicitações de mudanças de temperaturas e reduzir as oscilações no sistema de controle..

## **Controle do comprimento de chama (FLM)**

O novo forno Walking Beam, em função de sua largura, é dotado de queimadores com comprimento de chama variável. Dependendo do comprimento da chama, o perfil de temperatura ao longo da largura do forno é diferente e isto afeta o perfil de temperatura ao longo do comprimento das placas. O comprimento de chama é ajustado em função dos comprimentos e posicionamentos das placas dentro do forno e do perfil de temperatura medido na saída do laminador desbastador. O correto ajuste do comprimento de chama é importante para obter um bom perfil de temperatura na saída do laminador desbastador. Entretanto, uma definição satisfatória da forma de realização deste ajuste exigiria um tempo considerável e observação detalhada do processo durante este tempo. O SO tornou este tempo relativamente curto, pois gerencia com maior rapidez e eficiência o controle do

comprimento de chama. Não foram definidos padrões manuais para este controle e atualmente ele é feito inteiramente pelo SO.

### **2.3 Gerenciamento da Qualidade Metalúrgica dos Produtos Aquecidos**

O Sistema de Otimização padrão desenvolvido pela Stein Heurtey (SH) objetivava originalmente:

- Garantir repetibilidade das condições de desenformamento das placas (qualidade de aquecimento).
- Maximizar a produção dos fornos (e conseqüentemente da linha).
- Reduzir o consumo de combustível e a formação de carepa no forno.

Para atender a estes objetivos a estratégia de aquecimento padrão do sistema era de “aquecer o mais tarde possível”, ou seja, utilizar temperaturas menores na seção de pré-aquecimento e maiores na de aquecimento. Tais objetivos são satisfatórios para linhas que produzem somente aços carbono (em geral aços baixo carbono). O SO já havia sido suficientemente testado em outras usinas para este tipo de material. No caso da ACESITA, entretanto, novos requerimentos se mostraram necessários em função da característica singular da linha de Laminação a Quente, que são:

- Processamento em um mesmo forno de aços especiais (Inoxidáveis, Siliciosos GNO, Siliciosos GO, Médio e Alto Carbonos, Carbonos Ligados) além dos aços baixo carbono.
- Processamento dos aços Siliciosos GO utilizando-se dois fornos simultaneamente.
- Gerenciamento térmico simultâneo de dois fornos diferentes com aços diferentes.
- Possibilidade de utilização de 3 fornos diferentes individualmente ou simultaneamente.

Muitos destes aços requerem “cuidados especiais” do ponto de vista da qualidade do produto durante o processo de reaquecimento. O sistema padrão da SH não era capaz de garantir tais pontos, principalmente para os aços inoxidáveis. Para que a aplicação do SO fosse viável para as características dos produtos da ACESITA foi necessário mudar o enfoque do mesmo. O enfoque principal, que era a redução de consumo de combustível e formação de carepa, passou a ser a garantia da qualidade metalúrgica dos produtos aquecidos de acordo com os padrões técnicos da ACESITA. Os objetivos originais do sistema foram preservados, pois estão implícitos nos padrões técnicos estabelecidos pela ACESITA. Entretanto, a preocupação com a qualidade dos produtos se sobrepõe ao de redução de consumo de combustível.

Durante o desenvolvimento do projeto a equipe da ACESITA discutiu com a SH os requerimentos de processo de produção, levando a uma revisão dos objetivos do Sistema de Otimização. Isto marcou uma nova fase de desenvolvimento deste Sistema de Otimização, onde foram acrescentadas as seguintes funcionalidades ao sistema:

- Limitação da temperatura superficial das placas.
- Gerenciamento da assimetria de aquecimento entre a face superior e inferior das placas.
- Gerenciamento da dissolução de compostos presentes na composição química dos aços.

A seguir são descritas cada uma destas novas funcionalidades citadas.

### **Limitação da temperatura superficial das placas**

Os aços inoxidáveis austeníticos são particularmente susceptíveis a um defeito denominado “Lasca de Aquecimento”. Este defeito se manifesta na forma de uma esfoliação nas bobinas laminadas à quente e a frio, e possui várias causas prováveis envolvendo os processos da Aciação e Laminação a Quente. Na LTQ uma das variáveis que mais influenciam o defeito é a temperatura superficial das placas durante o reaquecimento. Altas temperaturas superficiais tendem a provocar maior ocorrência do defeito. Dessa forma, no SO foi criado o parâmetro **“Temperatura Máxima Superficial”**. Quando este parâmetro é utilizado, a estratégia de aquecimento é alterada tendendo a aquecer a placa “mais cedo” em relação à estratégia padrão (“aquecer o mais tarde possível”). Isto significa que o objetivo de final da seção de pré-aquecimento é elevado, e dessa forma, o trabalho da seção de aquecimento é reduzido, tornando necessárias temperaturas menores.

### **Gerenciamento da assimetria de aquecimento entre a face superior e inferior das placas**

Os aços inoxidáveis são susceptíveis a um outro tipo de defeito proveniente do forno de reaquecimento denominado “Esfoliação por Skids”. Este defeito é gerado pelo contato da superfície inferior das placas com as almofadas dos skids que, sob certas condições, geram marcas nesta superfície e que, por sua vez, depois de laminadas geram as esfoliações. Uma das variáveis detectadas como forte causa potencial foi a temperatura da face inferior das placas. Altas temperaturas da face inferior das placas tendem a gerar maior ocorrência do defeito. Foi então criado o parâmetro **“Relação entre os Fluxos Térmicos na Face Superior e Inferior das Placas”**. Este parâmetro pode ser estabelecido para cada seção individual do forno (pré-aquecimento, aquecimento, encharque) e quando informado atua nos valores de Relação de Demanda Térmica entre as Zonas Superiores e Inferiores. Assim, é possível definir o aquecimento da face inferior das placas (para mais ou para menos) em determinada seção do forno.

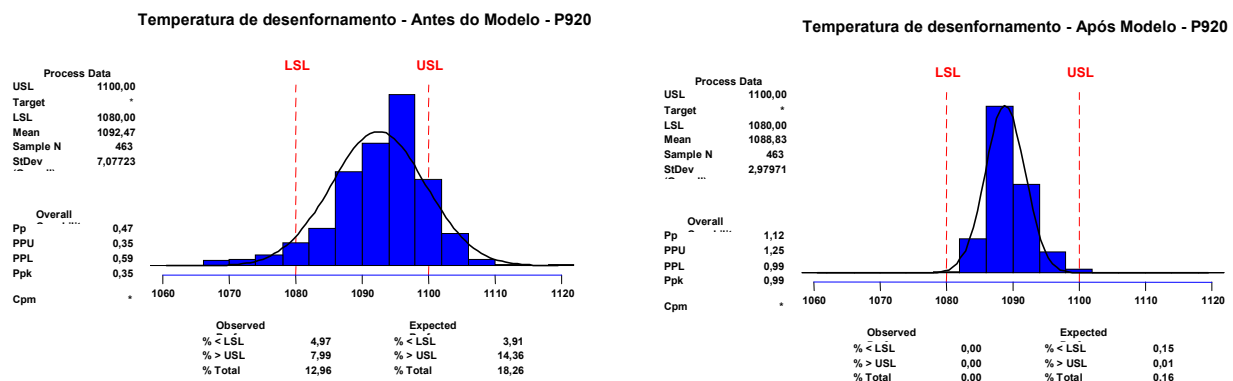
### **Gerenciamento da dissolução de compostos presentes na composição química dos aços**

Os aços Siliciosos GO, durante o reaquecimento no forno Pusher, exigem a garantia de que as placas fiquem acima de uma determinada “temperatura de dissolução” durante um tempo maior ou igual a um “tempo de dissolução” determinado. Isto é importante para a dissolução satisfatória de sulfetos que deverão precipitar adequadamente durante o processo de laminação, de forma a garantir parte do mecanismo que leva à obtenção das propriedades magnéticas deste aço.

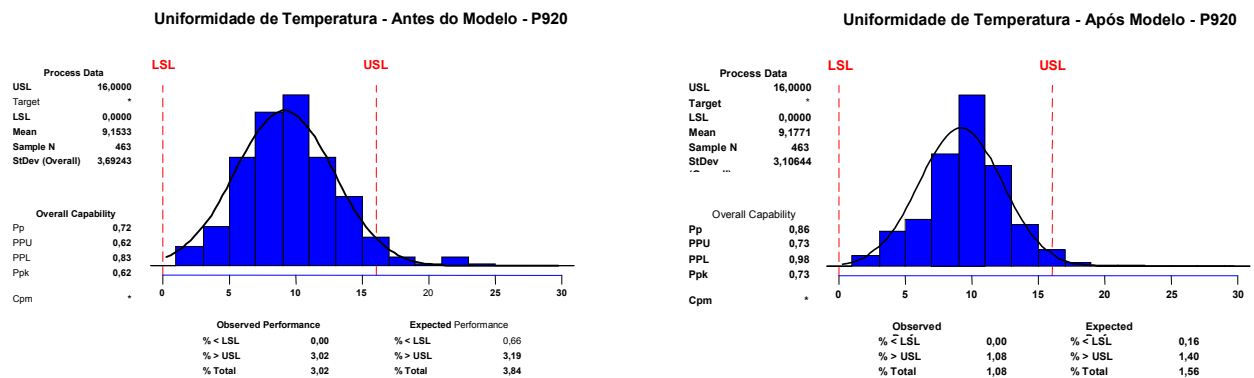
Foram criados os parâmetros “**Temperatura de Dissolução**” e “**Tempo Mínimo de Dissolução**”. Através destes parâmetros a curva de aquecimento padrão do sistema é adequadamente alterada no sentido de aquecer “mais cedo”, de forma a garantir o fenômeno de dissolução desejado.

### 3 RESULTADOS DO CONTROLE DE TEMPERATURA DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO

A Figura 3 mostra a variação da temperatura de desenformamento para placas desenformadas sem o uso do Modelo Térmico e com o Modelo Térmico. A Figura 4 mostra a variação da uniformidade da temperatura das placas desenformadas sem o uso do Modelo Térmico e com o Modelo Térmico. Sendo a uniformidade definida como a diferença de temperatura entre a superfície e centro da placa. Pode-se observar que o controle de temperatura pelo modelo térmico melhora a distribuição da variação da temperatura em torno da média e reduz a variância do desvio da temperatura. Os resultados são para o aço silício P920.



**Figura 3.** Variação da temperatura de desenformamento, sem modelo e com modelo para o aço silício P920.



**Figura 4.** Variação da uniformidade de temperatura, sem modelo e com modelo para o aço silício P920.



## 4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a utilização do Sistema de Otimização trouxeram conhecimento de informações do processo de reaquecimento que antes não eram disponíveis, tais como: temperatura média de placa, uniformidade de temperatura, temperaturas superficiais, curvas de aquecimento real das placas dentro do forno.

A análise dos resultados da utilização do SO permitiu identificar alguns pontos de melhoria do processo como, por exemplo, a redução das temperaturas de zonas do forno. E isto contribui para a redução de consumo de combustível e da redução de formação de carepa.

O aumento de produtividade dos aços carbono e inoxidáveis foi viabilizado pelo SO, diminuindo perdas em situações em que uma atuação manual não seria factível ou vantajosa como, por exemplo, enformamento de diferentes condições (comprimentos de placas, produtividades do laminador, etc.) em uma mesma carga do forno.

A utilização do SO possibilitou uma execução mais rápida e precisa de experiências de aumento de produtividade do aço silicioso GO na LTQ.

O SO originalmente não atendia os requerimentos de processo para os aços da ACESITA. A atuação da equipe da ACESITA foi fundamental para que as mudanças necessárias no sistema fossem feitas tornando-o assim adequado às necessidades da LTQ.

Apesar de toda a complexidade do sistema, o comissionamento foi concluído em menos de 8 meses. Após este período o índice de utilização das principais funções já estava consolidado em patamares acima de 90 % no forno WB2,.

# THE USE OF A THERMAL MODEL IN THE ACESITA'S HOT STRIP MILL SLAB REHEATING FURNACES <sup>1</sup>

*Benjamin Fullin Júnior*<sup>2</sup>  
*Carlos Roberto Gonçalves*<sup>3</sup>  
*Luciano Lellis Miranda*<sup>4</sup>  
*Luiz Alberto de Oliveira Martins*<sup>5</sup>

## **Abstract**

In the year of 2000 ACESITA bought a new Walking Beam furnace, constituting the third furnace of the hot strip mill. An automation system has been developed to the Furnaces Area of Hot Strip Mill in order to manage three furnaces, namely: Walking Beam furnace 1 (WB1), Walking Beam furnace 2 (WB2) and the Pusher furnace. The automation system includes functions as: scheduling management, slab tracking and an Optimization System for Slab Reheating. The Optimization System includes a Reheating Thermal Model to the furnaces. The main functions of Reheating Thermal Model are: slab thermal tracking, heating curves calculation for each product, furnace temperature set points calculation and the furnace pacing control. With the Reheating Thermal Model it is possible to automatically control the process of slabs reheating. The Thermal Model, developed by Stein Heurtey (the Walking Beam 2 manufacturer) has been adapted to the different ACESITA's process and production conditions, and specific modifications have been done to achieve the ACESITA'S specific process conditions. The Thermal Model development involved the Process Control and Automation teams. The Optimization System utilization has allowed to achieve results as: a better knowledge of slabs reheating process; a better furnaces transition and temperature management with assurance of specific characteristic of ACESITA's process; productivity increase for carbon and stainless steels; process temperature reduction, allowing fuel consumption reduction and scale formation process reduction.

**Key-words:** Walking Beam furnace; Automation; Optimization system.

<sup>1</sup> *Technical Contribution to IX Seminário de Automação de Processos, 05 a 07 de Outubro de 2005, – Curitiba – PR.*

<sup>2</sup> *Mechanical Engineer - MSC – Manager of ACESITA's Hot Strip Mill Reheating Furnace Operation Department.*

<sup>3</sup> *Electrical Engineer – Technical Assistant of ACESITA's Automation and Electronic Department.*

<sup>4</sup> *Metalurgist Engineer – Technical Assistant of ACESITA's Hot Strip Mill Technical Department.*

<sup>5</sup> *Electrical Engineer – Technical Assistant of ACESITA's Automation and Electronic Department.*