

NOVAS TECNOLOGIAS APLICADAS AO FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS DO LTQ DA CST ⁽¹⁾

Ângelo Campos Moreira ⁽²⁾
Lara de Assis Moreira ⁽³⁾
Carlos Alberto Cerutti ⁽⁴⁾
Alexander de Oliveira Botelho ⁽⁵⁾
Cláudio Roberto Campos ⁽⁶⁾

Resumo

A Companhia Siderúrgica de Tubarão iniciou a produção de seu LTQ em agosto de 2002. O projeto incorpora o estado da arte em tecnologias de laminação de tiras a quente, dentre estas o “forno digital”, nova concepção de controle de combustão e reaquecimento de placas.

Esta concepção compreende os queimadores trabalhando em regime de queima ótimo permitindo o máximo aproveitamento da energia aplicada, diferentemente dos fornos convencionais, onde os queimadores apresentam menor rendimento quando operam em vazões abaixo da projetada.

Destacam-se também, os modelos computacionais que incorporam novas tecnologias de controle de aquecimento de placas. Entre outros, foram desenvolvidos o modelo de micro-zonas de aquecimento, que objetiva a minimização dos desvios entre as temperaturas de descarregamento visada e obtida, e o controle do perfil térmico de aquecimento das placas, que reduz a variação de temperatura ao longo do comprimento das placas.

Este trabalho apresenta as tecnologias e as melhorias incorporadas durante o comissionamento no “forno digital” especialmente os resultados já obtidos de qualidade de reaquecimento, produtividade, consumo de combustível e atendimento das legislações ambientais mais rigorosas no tocante à geração de poluentes.

Palavras chaves: forno de reaquecimento, laminação, tiras a quente, LTQ.

1. *Contribuição Técnica a ser apresentada no 41º Seminário de Laminação – Processos e Produtos laminados e Revestidos da ABM – Joinville-SC-ES – 26-28 de outubro de 2004*
2. *Engº Metalúrgico, Especialista em Fornos de Reaquecimento de Placas da Divisão Técnica de Laminação de Tiras a Quente – CST*
3. *Engª Eletricista, Especialista em Automação e Controle de Processo da Divisão de Engenharia de Automação – CST*
4. *Tec Eletricista, Técnico em Manutenção da Divisão de Manutenção e Controle de Processo de Aciaria e Laminação – CST*
5. *Engº Mecânico com ênfase em Mecatrônica, Especialista em Automação e Controle de Processo da Divisão de Engenharia de Automação – CST*
6. *Tec. Metalúrgico, Operador do Forno de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente – CST*

1. Introdução

A competitividade de uma empresa pode ser medida pelo seu êxito em alcançar a otimização de seu processo na obtenção da qualidade desejada para seus produtos e pela redução de seus custos.

Cerca de 30 % do custo de conversão do processo de laminação a quente está relacionado ao processo de reaquecimento de placas. Daí, grandes esforços são concentrados na redução de consumo específico de combustível no forno de reaquecimento de placas.

É conhecido que a qualidade de aquecimento (uniformidade e nível das marcas de skid) é uma premissa básica para o atendimento das mais restritivas tolerâncias dimensionais, forma e de propriedades mecânicas em um laminador de tiras a quente.

Dentre os equipamentos com alta tecnologia presentes no projeto do LTQ da CST, encontra-se o Forno de Reaquecimento de Placas. O forno da CST é o primeiro forno de reaquecimento de placas do mundo a utilizar a tecnologia digital (controle on-off) para todo range de processo, entre outras tecnologias.

2. Configuração de Projeto

O Forno de Reaquecimento de Placas do LTQ da CST apresenta as seguintes características básicas de projeto:

Fabricante:	Stein Heurtey (França)
Tipo:	Walking Beam (três seções de skids defasados)
Comprimento:	56,6 m
Largura:	12,1 m
Altura:	3,7 m
Produtividade:	400 t/h (para 100 % de taxa de cobertura)
Consumo específico:	≤ 320 Mcal/t
Combustível:	Gás Misto (COG + BFG + GN) – 2600 kcal/Nm ³

Na tabela I é mostrada a distribuição dos queimadores e o comprimento das zonas ao longo do forno.

Tabela I - Configuração das Zonas de Combustão do forno da CST

ITEM	Zonas do Forno								
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Região do Forno	Pré-aquecimento		Aquecimento 1		Aquecimento 2		Encharque		
Comprimento	7,9 m		10,0 m		10,8 m		6,6 m		
Nº de Queimadores	4	4	6	6	8	8	10	4	11
Tipo de Queimador	CL	CL	CL	CL	CL	CLM	CP	CLM	CP
Controle Digital	X	X	X	X	X	X		X	
Controle Proporcional							X		X

Legenda:

CL – Queimador de Chama Larga (queimador lateral)

CLM - Queimador de Chama Larga Modulável – Possuem ajuste do comprimento da chama (queimador lateral)

CP – Queimador de Chama Plana (queimador de abóbada)

Os queimadores são distribuídos ao longo das paredes laterais e no teto do forno para a zona de encharque. A distribuição dos queimadores em relação ao forno e aos skids pode ser vista na figura 1.

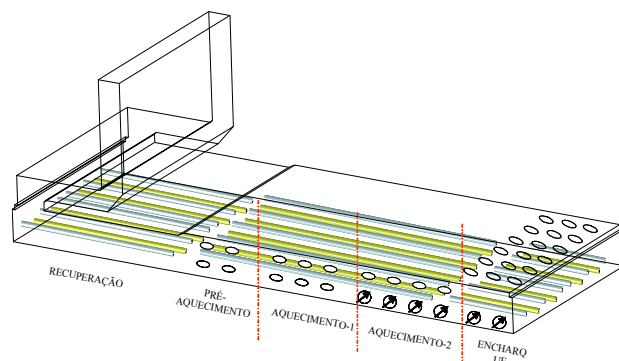


Figura 1 – Desenho esquemático mostrando zonas, queimadores e skids (móveis e fixos) para o forno da CST

Os queimadores de Chama Larga proporcionam uma melhor distribuição do calor ao longo do comprimento do forno. A forma da chama reduz a concentração de calor nas regiões próximas aos queimadores. (figura 2)

Os queimadores de Chama Larga Modulável proporcionam uma melhor distribuição do calor ao longo da largura do forno. A característica de ajustar o comprimento da chama permite que seja feita uma melhor distribuição de calor ao longo do comprimento das placas no interior do forno. (figura 2)

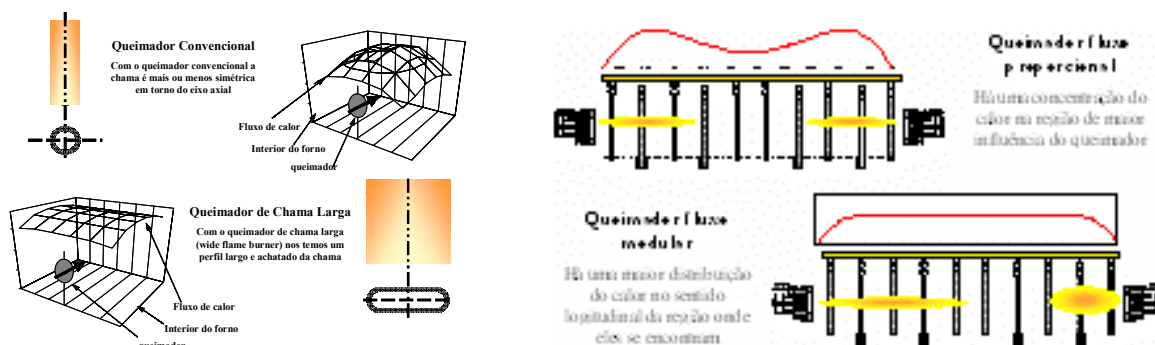


Figura 2 – Comparativo entre os queimadores de chama larga e convencional e as distribuições de calor obtidas por queimadores de chama modulável e convencionais

3. Controle Digital

É denominado controle digital, aquele onde a demanda de calor necessária é obtida pelo tempo de abertura do queimador, que nesta zona opera somente aberto (100%) ou fechado (0%). Desta forma, o queimador só trabalha em regime de vazão, podendo ter seu dimensionamento projetado para esta única condição. Este fato permite um rendimento do combustível injetado.

A relação de vazão entre o combustível e o ar (ratio) em cada zona do forno é obtida entre os tempos de abertura das válvulas de ar e combustível.

Os queimadores apresentam um rendimento ideal em vazões acima de 30% da sua faixa de trabalho. Isto se deve ao fato de nesta faixa haver uma mistura perfeita entre o combustível e o comburente (os queimadores das zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8 do forno da CST só trabalham com 0% ou 100% da vazão - on/off). (figura 3)

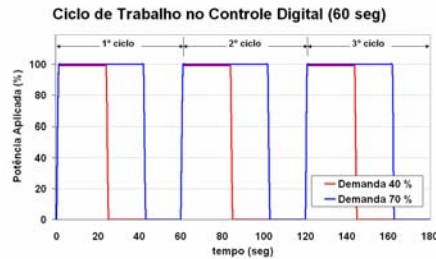


Figura 3 - Gráfico que representa o controle da demanda (ciclo) nas zonas e controle digital.

No caso do Controle Proporcional (convencional), a relação de vazão de combustível e ar em cada zona do forno obedece a demanda de calor necessária. Neste tipo de controle todos os queimadores ficam acesos e a vazão em cada um é uma relação entre a vazão total e o número de queimadores.

A relação ar/combustível varia de acordo com a vazão de combustível. Esta variação é necessária para compensar a não obtenção de uma perfeita mistura em vazões de combustível abaixo de 30%.

Alguns softwares de controle contemplam uma curva de excesso de ar que varia de acordo com a vazão do queimador. Valores de vazão abaixo de 10 % correspondem a um excesso de ar de 30% e entre 10 e 30% de vazão assume uma curva que atinge o valor de 10% de excesso de ar para valores de vazão acima de 30%. (figura 4)

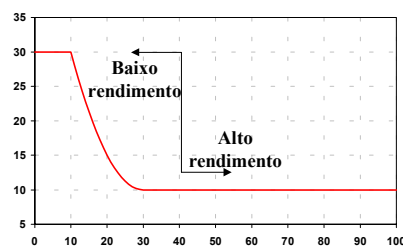


Figura 4 - Gráfico da variação da relação ar/combustível nas zonas com controle proporcional.

A opção da CST pelo sistema de controle digital deve-se ao fato deste sistema obter um ótimo rendimento do forno pela redução do excesso de ar e por operar sempre na faixa ótima de trabalho do queimador. Só é utilizado controle proporcional nas zonas 7 e 9 (encharque superior) do forno da CST devido ao tipo de queimador não se adaptar à filosofia de controle digital

O controle digital apresenta as seguintes vantagens sobre o controle proporcional:

- Menor perda metálica por carepa primária;
- Menor consumo específico de combustível;
- Respostas mais rápidas às necessidades de alteração de temperatura das zonas e dos produtos (placas aquecidas).
- Menor geração de NOx.

4. Desafios para a implantação do Controle Digital

A premissa básica para o funcionamento do controle digital é um perfeito controle da pressão do gás e do ar. Esta necessidade aliada ao grande número de quebras por fadiga das válvulas shut-off individuais dos queimadores foram os maiores obstáculos para a implantação do controle digital no forno da CST.

Na busca pelo aprimoramento do controle da pressão foram implantadas durante o comissionamento as seguintes estratégias:

4.1 Adaptação do tempo de ciclo.

O ciclo é relacionado ao tempo para a obtenção de 100% da demanda de calor para uma determinada zona. Quando menor o ciclo mais preciso se torna o controle da temperatura, porém há um compromisso estreito entre a capacidade do equipamento final (válvulas shut-off) e a performance na obtenção da demanda e homogeneidade requeridas. No caso CST o ciclo esteve configurado entre 20 e 120 segundos, sendo estabelecido o melhor ponto de operação em 60 segundos.

4.2 Alternância da seqüência de início de abertura de queimadores de baixa e alta potência.

O fato das zonas possuírem capacidades diferentes reflete-se na capacidade individual de cada queimador e conseqüentemente no impacto gerado pela sua abertura, tanto no próprio controle das pressões de ar e gás como na capacidade de resposta da estação misturadora.

Para que seja explorada a total capacidade do forno sem comprometer o equipamento da estação de mistura, o sistema de controle é programado de tal forma a defasar o início de operação de cada queimador e permitir a configuração da seqüência de abertura. A figura 5 mostra um exemplo da distribuição de queimadores.

A flexibilidade tornou possível a busca do melhor tempo de ciclo e da melhor seqüência, garantindo a varredura total do forno dentro deste ciclo, sem degraus de demanda que imputassem risco à estação misturadora.

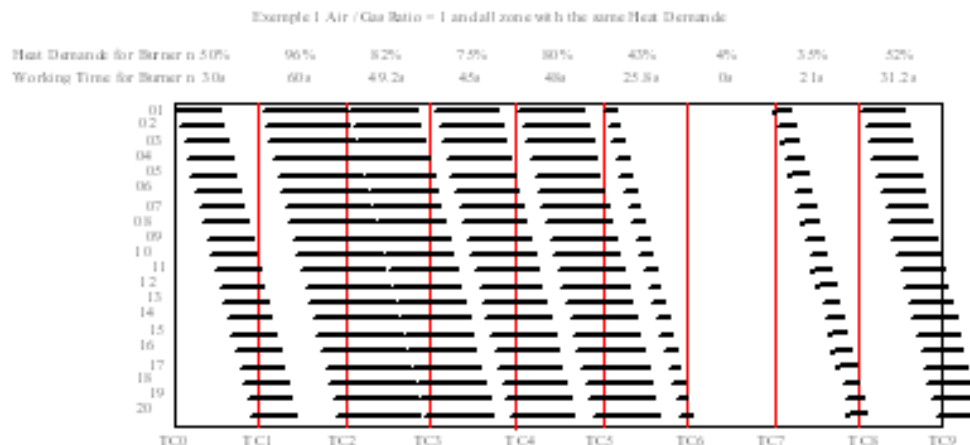


Figura 5 - Gráfico da seqüência de queimadores

4.3 Controle antecipativo

Como o controle da abertura dos queimadores é feito por ciclos, é possível conhecer no início de cada ciclo o impacto gerado pela abertura de cada queimador. Esse impacto reflete-se na pressão de gás, na pressão de ar e na pressão interna do forno. Por esse motivo foram estudadas e implantadas funções para cada um desses controles, que refletem o comportamento do fator antecipativo nas diversas condições de demanda total do forno e levam em consideração a capacidade de resposta dos equipamentos envolvidos no controle.

4.4 Gerenciamento da abertura dos queimadores (Pile FIFO)

Além do controle da seqüência de abertura citado anteriormente, o sistema de controle é capaz de otimizar a abertura dos queimadores para minimizar os degraus de demanda. Esse controle é feito liberando abertura do queimador da seqüência,

baseado em priorização por desligamento de algum queimador já ligado ou por demanda máxima da zona.

O efeito desse controle é minimizar degraus instantâneos de demanda.

4.5 Troca da válvula controladora de pressão do gás

Durante o período de ajuste do controle da pressão de gás, onde foi almejado o menor índice de variabilidade nas diversas condições de demanda, constatou-se um comportamento típico de válvula de controle não ajustada às condições de processo. Observou-se que nas baixas vazões a válvula de controle operava fora da sua faixa de controlabilidade (figura 6), o que levou a uma investigação dos parâmetros de projeto e à conclusão do sub dimensionamento deste equipamento. Dentre algumas alternativas de modificação optou-se então pela troca da válvula com parâmetros de projeto, adequados à situação real de processo.

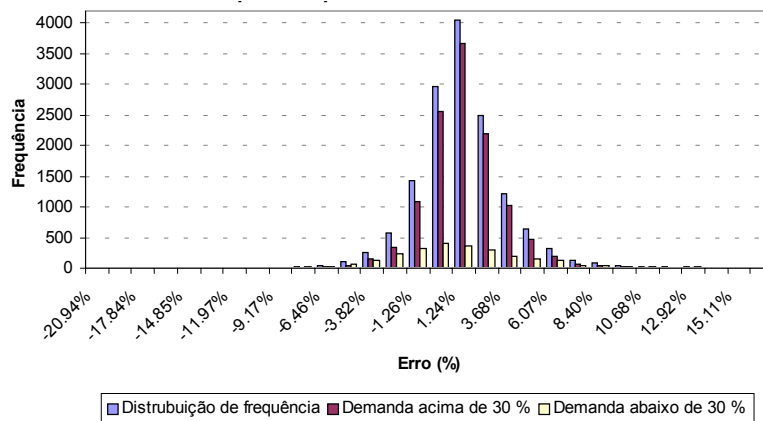


Figura 6 - Gráfico da distribuição do erro no controle da pressão de gás (valor medido – set-point)

4.6 Ajustes no controle da estação misturadora de gás

A grande influência do consumo do forno e as características do perfil de demanda no controle da estação misturadora levou a um estudo conjunto de ambas as estratégias de controle. Por um lado o forno é responsável por manter os degraus de demanda em valores que correspondam à resposta da estação misturadora, por outro lado a estação misturadora é responsável por manter a qualidade do gás e por manter a pressão fornecida dentro dos parâmetros pré estabelecidos.

A integração dos controles foi conseguida pelas diversas estratégias já citadas anteriormente, incluindo a utilização do parâmetro antecipativo fornecido pelo Forno diretamente ao controle das malhas de mistura.

5 - Arquitetura do sistema de controle

O controle do forno de aquecimento é distribuído em 3 sistemas: (figura 7)

- PLC Heating (nível 1) – Automatismo do controle da combustão, temperaturas das zonas, abertura dos queimadores, pressão interna do forno, pressões de ar e gás, monitoramento dos pontos de refrigeração e segurança do forno.
- PLC Handling (nível 1) – Automatismo do enforamento, movimentação das vigas caminantes e desenforamento
- FSC (Nível 2) – Sistema de otimização do controle de aquecimento das placas através de modelos matemáticos.

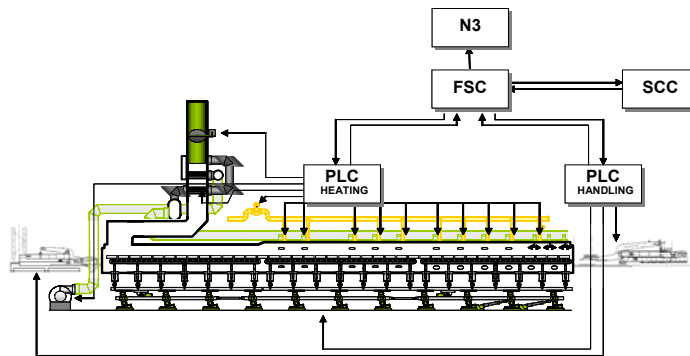


Figura 7 - Representação esquemática da comunicação entre os computadores de processo

6 – Principais funções do sistema de nível 2

6.1. Physical Tracking (PTR)

Função responsável pelo gerenciamento físico de todas as placas dentro do forno, sendo seu objetivo principal manter o rastreamento físico das placas (atualização on line do mapa do forno).

6.2. Thermal Tracking (THE)

Função responsável pelo gerenciamento térmico de todas as placas dentro do forno, permitindo o acompanhamento de todas as características térmicas (temperaturas ao longo da espessura, uniformidade térmica e taper térmico calculados pelo modelo) de cada placa ao longo de seu aquecimento (atualização on line).

Essencial para os cálculos dos setpoints de temperatura (Funções CTL) e intervalos de tempo para movimentação do walking beam (Função ACT).

6.3. Remaining Residence Time (RRT)

Função responsável pelo gerenciamento dos tempos de permanência (previsto, atual e restante) de todas as placas dentro do forno. O tempo previsto é utilizado no cálculo da curva ótima de aquecimento (Função OHC) e o tempo restante de cada em cada zona de aquecimento é utilizado nos cálculos dos set-points (Função CTL).

6.4. Optimal Heating Curve (OHC)

Função responsável pelo cálculo da curva ótima de aquecimento, no enformamento, através da determinação das temperaturas visadas de cada placa no final de cada zona de aquecimento (convencional e queimadores).

Estes valores visados são utilizados nos cálculos dos setpoints de temperatura (Funções CTL) e intervalos de tempo para movimentação do walking beam (Função ACT).

6.5. Furnace Control (CTL)

Função responsável pelo controle do forno de reaquecimento de placas, em particular, calculando os setpoints ótimos de temperatura para as zonas superiores de aquecimento e os fatores de vazões para as zonas inferiores para o controle vinculado.

Esta função busca um comprometimento no aquecimento para que placas com diferentes características, dimensões e objetivos sejam aquecidas o mais próximo possível da sua curva ótima de aquecimento.

O modo de controle por zona de queimadores permite uma maior flexibilidade para minimizar sub-aquecimentos e sobre-aquecimentos, pois se trata de micro-zonas dentro de uma zona física de aquecimento.

6.6. Active Pacing (ACT)

Função responsável pelo controle do ritmo do forno (intervalo entre movimentações do walking beam e tempo de desenformamento) a fim de que todos os requisitos térmicos das placas sejam alcançados no desenformamento, visando maximizar a produção.

Esta função só considera placas que estejam sub-aquecidas (abaixo do limite inferior), ou seja, quando as placas estão com temperatura adequada ou até mesmo sobre-aquecidas, a função solicita movimentações consecutivas do walking beam, sem intervalos de tempo entre os mesmos.

6.7. Flame Length Control (FLM)

Função responsável pelo cálculo do comprimento de chama dos queimadores de fluxo modulado com o objetivo de otimizar o perfil de temperatura longitudinal, ou seja, melhorar o perfil ao longo do comprimento das placas nas zonas inferiores de aquecimento 2 e encharque.

Existem cinco (05) módulos de controle (Teórico, Potência, Taper, Correção e Paradas) que determinam o valor de set-point (chama longa ou curta) a ser aplicado no aquecimento on line das placas, sendo o módulo Correção responsável por minimizar os pontos frios detectados em placas laminadas.

6.8. Mill FeedBack (MFB)

Função responsável pelo cálculo da temperatura média de desenformamento das placas após sua laminação, determinando assim uma correção nas temperaturas visadas (offset) de desenformamento para minimizar desvios na extração. Este cálculo é efetuado através de um modelo matemático baseado em dados de laminação.

6.9. Furnace Heat Balance (FBL)

Função responsável pelo cálculo do balanço térmico do forno e do recuperador para períodos pré-determinados (hora, turno, dia, semana, mês e ano) para análise posterior.

6.10. Heat Demand Control (HDC)

Função responsável pelo cálculo de ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i) utilizados nos controladores PID (Nível 1 ou Nível 2), utilizando recursos de lógica fuzzy, com o objetivo de otimizar os tempos de respostas conforme o estado/regime (permanente ou transiente) do forno.

A figura 8 mostra uma visão geral das funções do nível 2.

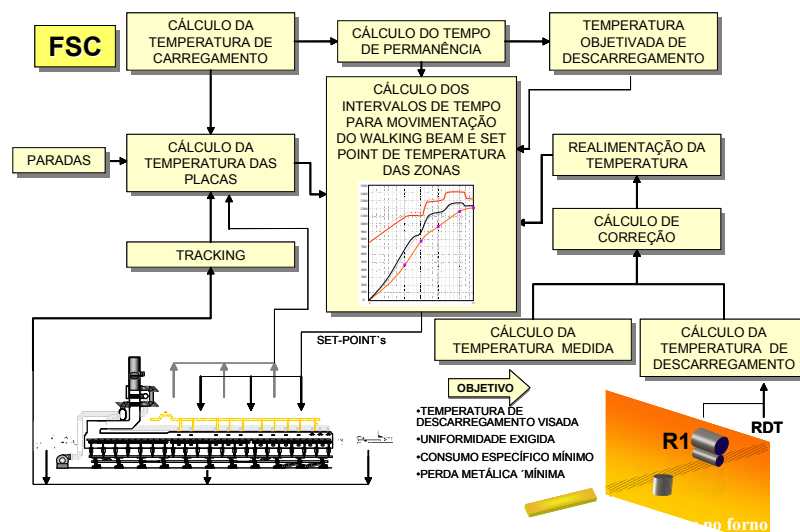


Figura 8 - Desenho esquemático do processo de controle do aquecimento das placas no forno

7 - Resultados Obtidos

7.1 - Consumo Térmico

O forno da CST já obtém resultados inferiores aos garantidos pelo fabricante (325 Mcal/t). Seus resultados geram grandes expectativas quando aliados aos gerados pela prática de enformamento a quente (atualmente 5 % acima de 400°C em maio/04).

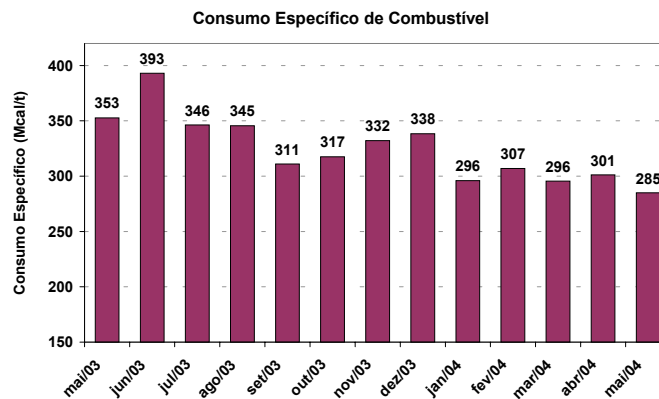


Figura 9 – Evolução Mensal do Consumo Específico de Combustível obtido no forno da CST (não foram excluídos os dias de paradas programadas).

7.2- Marcas de Skid

Em razão da defasagem dos skids, o nível médio de marcas de skid é de 13°C para o ritmo de produtividade máxima (400 t/h). Estes resultados de uniformidade atendem às mais severas condições de processamento em um LTQ.

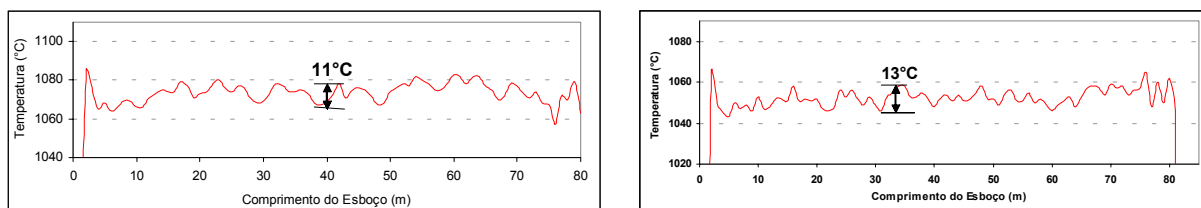


Figura 10 – Exemplos de registros gráficos de temperatura de placas, após processamento no laminador de desbaste (RDT), onde o forno trabalhou em ritmo de produtividade máxima (400 t/h). É possível observar o nível de marcas de skid em torno de 13°C.

7.3 - Alteração de temperatura objetivada de descarregamento.

Em razão da possibilidade de dividir as zonas em micro-zonas de pares de queimadores, é possível obter variações mais rápidas na temperatura de descarregamento conforme exemplo da figura 11.

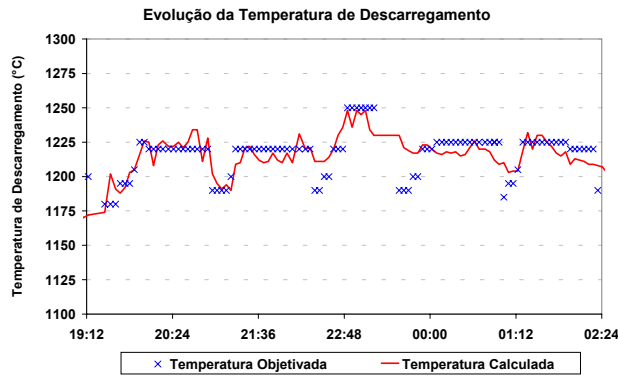
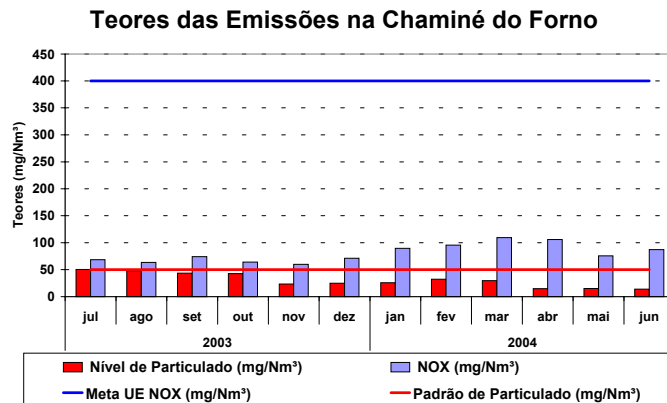


Figura 11 – Exemplo de temperaturas de extração de placas enformadas com bruscas variações de temperatura objetivada de extração.

7.4 Emissão de Poluentes

Em razão da condição de trabalho dos queimadores digitais (chama homogênea e baixo excesso de ar) a geração de NOx é minimizada. No gráfico da figura 12 observam-se os valores médios mensais dos teores de NOx e particulados nos gases analisados na chaminé. Os resultados são muito inferiores aos apresentados pela legislação brasileira e da comunidade européia.



8 - Conclusões

Os resultados obtidos de consumo específico de combustível e de marcas de skid mostram que a opção da CST pelo forno impulsional foi correta. O forno da CST destaca-se entre os melhores fornos do mundo sob estes aspectos e serve como referência para os novos projetos de fornos de reaquecimento de placas.

9 - Referências Bibliográficas

- 1 - Pakula, A., Technical Specification for PLC Heating, Published by Stein Heurtey 2000..
- 2 - Morel, G., Technical Specification for PLC Handling, Published by Stein Heurtey 2000..
- 3 - Mitais, Technical Specification for FSC, Published by Stein Heurtey 2000.
- 4 - Mitais, J.C.; Barthelemy, A., Training Manual for FSC, Published by Stein Heurtey 2002.

NEW TECHNOLOGIES APPLIED TO SLAB REHEATING FURNACE OF CST'S HSM ⁽¹⁾

Ângelo Campos Moreira ⁽²⁾
Lara de Assis Moreira ⁽³⁾
Carlos Alberto Cerutti ⁽⁴⁾
Alexander de Oliveira Botelho ⁽⁵⁾
Cláudio Roberto Campos ⁽⁶⁾

Abstract

The Companhia Siderúrgica de Tubarão started production of its new Hot strip Mill in August 2002. This new project incorporates the state of art in Hot Strip Mill Technologies, including “The Digital Furnace”, a new concept of combustion control applied to slabs reheating.

This conception is based on the burners working at the optimal combustion point, allowing the maximum efficiency of the applied energy, differently from conventional furnaces, where the burners present less efficiency when working at flow ranges below the project.

We also point out the computational models which incorporate the new slabs heating control. The micro zones model is designed to obtain the minimum deviation between the target discharging temperature and the actual slab temperature at discharging side. The thermal profile control reduces the temperature variation along the slab length.

This effort presents the technologies and improvements added during “The Digital Furnace” commissioning, specially the results already achieved in reheating quality, productivity, fuel consumption and to comply the environmental standards regarding pollutants emissions.

Key words : reheating furnace, hot strip mill.

1. *Technical Contribution to 41st Rolling Seminary – 41st Rolling Seminar – October 26 to 28, 2004 - Joinville - SC - Brazil*
2. *Metallurgical Engineer, Reheating Furnace Specialist of Hot Rolling Technical Division – CST*
3. *Electrical Engineer, Automation and Process Control Specialist – Automation Engineering Division – CST*
4. *Electrical Technical, Maintenance Technical of Process Control of Hot Rolling Division – CST*
5. *Mechanic Engineer, Automation Specialist of Engineering of Automation Division – CST*
6. *Metallurgical Technical, Reheating Furnace Operator of Hot Strip Mill Rolling Section – CST*