

# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE EM UM FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS PARA LAMINAÇÃO<sup>1</sup>

*Paulo Vicente Correa*<sup>2</sup>  
*Bernardo Soares Torres*<sup>3</sup>  
*Bruno Walter Tschoepe*<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho apresenta, a partir de uma aplicação prática na indústria siderúrgica, o desenvolvimento de um trabalho de auditoria de malhas de controle em um forno de reaquecimento de tarugos para a laminação. Destaca-se que, através do emprego de novas ferramentas específicas para monitoração e análise de malhas de controle, é possível avaliar continuamente e obter diagnósticos automáticos sobre o funcionamento destas malhas, o que contribui significativamente para o processo de auditoria de malhas e melhoria de desempenho. São apresentados exemplos e resultados práticos da implementação de software para monitoração on-line de malhas de controle e diagnósticos automáticos de problemas, como histerese e agarramento em válvulas, problemas de implementação de estratégias de controle, oscilações e suas causas. Todos os exemplos foram obtidos em um forno de reaquecimento de tarugos, no qual são controladas temperaturas, pressões e vazões de ar, gás de alto forno e gás natural. Através dos resultados das ferramentas utilizadas e do trabalho de auditoria de malhas, foi possível identificar falhas e sugerir correções, tanto em hardware quanto em programação. Os benefícios do trabalho de auditoria estão relacionados à um menor consumo de combustível no forno, redução da produção de carepa e menor variabilidade do processo, levando à uma maior estabilidade operacional e desempenho.

**Palavras-Chave:** Malhas de controle; Otimização de processos; Forno de tarugos; Laminação.

<sup>1</sup> IX Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 05 a 07 de outubro de 2005 – Curitiba – PR, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Eletrônico – Departamento de Otimização da ATAN Sistemas, Belo Horizonte – MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista, M.Sc, Gerente do Departamento de Otimização da ATAN Sistemas, Belo Horizonte – MG, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro - PMI/M - Gerência Instrumentação Eletrônica, V & M do BRASIL S. A., Belo Horizonte – MG, Brasil.

## **1 INTRODUÇÃO**

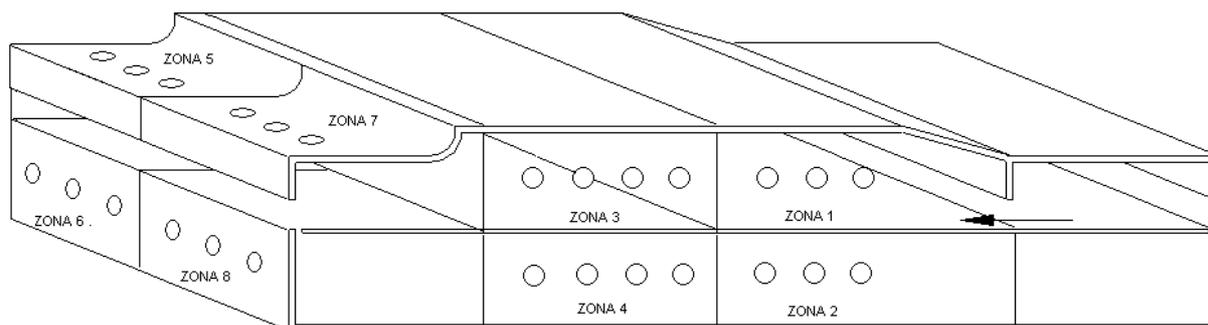
O controle de processos siderúrgicos é caracterizado por apresentar elevado consumo energético e várias malhas de controle associadas a diversos equipamentos diferentes. A grande maioria destas malhas são controladas por controladores PID, os quais, muito freqüentemente, apresentam baixo desempenho e amplificam as variabilidades do processos. Várias são as causas para este baixo desempenho observado, entre elas sintonia inadequada, estratégias de controle questionáveis, problemas de implementação nos controladores, ruídos elevados, problemas de agarramento, histerese e mau dimensionamento de válvulas, entre outros. Como o número de malhas é geralmente elevado e os recursos de manutenção escassos, não é dada a devida atenção para as malhas de controle. Contudo, novas ferramentas de software já estão disponíveis para realizar a avaliação de todas as malhas de controle simultaneamente, apresentando diagnósticos automáticos de problemas e assim auxiliando as equipes de manutenção a manter o desempenho do sistema constantemente no ponto ótimo. Este trabalho irá mostrar as principais conclusões do processo de auditoria de malhas de um forno de reaquecimento de tarugos da V&M do Brasil, localizada em Belo Horizonte, MG. A auditoria foi realizada nos meses de outubro, novembro e dezembro/2004, e utilizou um software dedicado para avaliação de desempenho, diagnóstico automático das malhas, análise detalhada e sintonia. Através da análise dos índices de desempenho obtidos a partir do software, foi possível identificar os principais problemas do forno e propor soluções que, uma vez implementadas, podem garantir:

- Redução da variabilidade das temperaturas do forno e conseqüente melhoria de qualidade do processo de laminação.
- Redução de oxidação de material, significando em menor produção de carepa e perda de material.
- Redução do consumo de gás natural na operação do forno.
- Redução do desgaste de atuadores e conseqüente aumento de disponibilidade dos equipamentos, diminuindo paradas para manutenção e maximizando a produção.

Neste artigo, inicialmente será feita uma breve descrição do processo e apresentação da metodologia utilizada para diagnósticos dos problemas. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos e as conclusões do trabalho, o qual pode ser estendido para praticamente todas as áreas siderúrgicas que apresentam malhas de controle.

## **2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO**

O forno tipo vigas móveis (walking beams) possui uma região sem queimadores na entrada (carregamento), seguida de duas zonas de pré-aquecimento, duas zonas de aquecimento e quatro zonas de encharque (equalização) conforme ilustrado na Figura 1.



**Figura 1.** Perfil do forno de reaquecimento de tarugos para a laminação.

O forno é alimentado, preferencialmente, com uma mistura de Gás de Alto-Forno e Gás Natural, numa proporção determinada pelo operador, de modo a obter o poder calorífico (PCI) adequado. Eventualmente pode ser alimentado em gás de alto forno puro, ou gás natural, caso haja falta daquele.

No canal de fumos, um ventilador de ar de combustão sopra-o através de um recuperador, onde é aquecido a cerca de 400°C. Um segundo recuperador aquece o gás de alto-forno. Essa recuperação de calor dos fumos e sua re-introdução no forno aumenta consideravelmente o rendimento do processo. Há um controle de pressão de ar de combustão atuando sobre um damper na descarga do ventilador, que tem sido mantido em manual.

Em cada zona do forno há um controlador PID de temperatura, o qual possui duas malhas escravas (vazão de ar e vazão de gás) as quais trabalham utilizando uma estratégia de duplo limite cruzado.

Ao todo o forno apresenta 36 malhas de controle (temperatura, vazão e pressão).

### **3 METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO DOS PROBLEMAS**

A avaliação de desempenho e diagnóstico automático de todas as malhas de controle do forno foram feitas utilizando-se um software específico para esta finalidade. O software foi conectado através do protocolo OPC ao sistema de controle do forno, onde foram amostrados dados em tempo real do sistema e calculados constantemente avaliações e índices de diagnóstico. O resultado final é apresentado em notas percentuais de fácil interpretação para cada aspecto considerado. O software monitora o forno de maneira ininterrupta, 24 horas por dia, avaliando o sistema de controle continuamente.

Após a interpretação dos diagnósticos fornecidos pelo software, análises específicas e testes de sintonia também foram empreendidos utilizando-se ferramentas nativas do próprio software.

Ressalta-se que a grande vantagem do software é justamente a monitoração contínua do sistema. Desta forma, quando a nota das malhas de controle começarem a apresentar desempenho insatisfatório, a equipe de manutenção já pode ser acionada para efetuar das modificações necessárias no sistema e garantir a sua alta performance. Todos os resultados de avaliação podem ser observados através de relatórios na WEB, a partir de qualquer computador da empresa. Podem também ser gerados e-mails automáticos quando situações limites forem atingidas ou envio periódico de relatórios de performance e diagnósticos. Todos os dados de

avaliação estão também disponíveis através de servidor OPC do próprio software de avaliação, para serem integrados a sistemas PIMS, MES e ERP.

## 4 DIAGNÓSTICOS E RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Controle de Poder Calorífico do Gás

Através dos trabalhos de auditoria de malhas, percebeu-se a possibilidade de obtenção de ganhos muito significativos através da aplicação de um esforço muito reduzido. As alterações necessárias englobam principalmente a alteração de algumas estratégias de controle implementadas e sintonia de malhas de controle.

A tabela a seguir, extraída do módulo WEB do software de avaliação de desempenho, mostra alguns diagnósticos das malhas de controle de temperatura das zonas do forno. Observa-se que todas as malhas apresentaram notas globais elevadas (Avg% to threshold > 60%), indicando assim o seu baixo desempenho. Quanto maior a nota da malha (Avg % to threshold), mais longe estamos do desempenho ideal desta malha, o que representaria nota 0%. Uma descrição detalhada dos índices de desempenho pode ser obtida em outros artigos já publicados.<sup>(1-3)</sup>

**Tabela 1.** Nota global para as malhas de temperatura (AVG% to Threshold) e alguns índices de diagnóstico.

Loop name	Avg % to thres hold	%T Variability	%T Avg abs error	%T Noise band	%T Oscillating	%T Time in normal	%T Valve reversals	%T Valve travel	%T Output at limit
TIC1821	65.94	<b>82.50%</b>	<b>111.10%</b>	53.10%	<b>100.00%</b>	0.00%	<b>85.10%</b>	<b>95.70%</b>	0.00%
TIC1721	60.35	40.10%	25.00%	42.50%	<b>100.00%</b>	0.00%	<b>81.30%</b>	<b>173.90%</b>	<b>20.00%</b>
TIC1621	62.23	<b>79.80%</b>	<b>99.10%</b>	53.30%	<b>100.00%</b>	0.00%	<b>107.20%</b>	36.30%	<b>22.00%</b>
TIC1521	71.11	<b>173.00%</b>	<b>183.40%</b>	12.80%	<b>70.00%</b>	0.00%	<b>64.40%</b>	<b>65.30%</b>	0.00%
TIC1421	97.34	<b>138.30%</b>	<b>134.60%</b>	31.20%	<b>90.00%</b>	0.00%	<b>190.60%</b>	<b>130.10%</b>	<b>64.00%</b>
TIC1321	77.3	<b>57.50%</b>	23.80%	32.40%	<b>70.00%</b>	0.00%	<b>113.20%</b>	<b>299.50%</b>	<b>22.00%</b>
TIC1221	70.73	<b>84.60%</b>	<b>81.30%</b>	54.50%	<b>100.00%</b>	0.00%	<b>81.00%</b>	<b>158.30%</b>	6.00%

Os maiores problemas das malhas de temperatura são caracterizados pelos índices que têm valores percentuais elevados na tabela acima, em negrito, a saber:

- Variabilidade (%T Variability): malhas apresentam grande variabilidade.
- Erro médio absoluto (%T Avg abs error): com exceção das malhas TIC1721 e TIC1321, as malhas de temperatura estão apresentando erro médio absoluto elevado, indicando a incapacidade do controlador em manter a variável de processo no setpoint.
- Oscilação (%T Oscillating): malhas apresentam oscilação constante.
- Atividade do sinal de controle (%T valve travel e reversals): grande atividade do sinal de controle.
- Saturação da saída do controlador (%T Output at limit): o sinal de controle permanece algum tempo saturado para aquelas malhas com este índice diferente de 0%.

Com base nestes diagnósticos, podemos perceber que para melhorar o desempenho das malhas de temperatura, será necessário eliminar as oscilações, o que acabará contribuindo para a redução de todos os índices, melhorando assim o desempenho global das malhas. Através da auditoria das malhas de controle, baseada nos diagnósticos do software de avaliação, foi descoberta que a causa das oscilações está relacionada com o Controle da Mistura e Poder Calorífico (PCI).

Das 36 malhas de controle do forno, foi detectado através do software de avaliação que 67% das malhas (24 malhas) oscilam com período de oscilação em torno de 280 segundos, coincidente com o período de oscilação das malhas de controle do PCI. A tabela abaixo ilustra a detecção automática dos 3 principais períodos de oscilação e causa das mesmas para as malhas de temperatura das zonas, pressão do forno e controle do poder calorífico.

**Tabela 2.** Diagnóstico de oscilação.

Loop name	Description	Oscillating	Oscillation period 1	Oscillation period 2	Oscillation period 3	Osc - Hardware	Osc - Tuning	Osc - Load
<a href="#">TIC1821</a>	Temperatura da Zona 8	100%	281.5	603.7	152.3	20%	0%	70%
<a href="#">TIC1721</a>	Temperatura da Zona 7	100%	282.2	629.9	158.3	0%	0%	90%
<a href="#">TIC1621</a>	Temperatura da Zona 6	100%	784.6	277	148.9	0%	0%	100%
<a href="#">TIC1521</a>	Temperatura da Zona 5	70%	801.3	294.7	189	0%	0%	100%
<a href="#">TIC1421</a>	Temperatura da Zona 4	90%	320	186.6	141.4	0%	0%	100%
<a href="#">TIC1321</a>	Temperatura da Zona 3	70%	277.2	146	107.9	30%	0%	60%
<a href="#">PIC1011</a>	Pressão do Forno	100%	282.5	622.9	147.8	0%	0%	100%
<a href="#">FIC1027</a>	Vazão do GN para a Mistura	100%	280.5	148.6	543.2	50%	0%	0%
<a href="#">PCIC1027</a>	PCI do Gás	100%	277.7	148.3	108.8	30%	0%	0%

Através da Tabela 2 podemos perceber que as oscilações nas malhas não são causadas por problemas de sintonia (Osc – Tuning), mas sim por problemas de hardware (Osc – Hardware) e acoplamento entre malhas (Osc – Load). Quanto maior o percentual destes índices de oscilação, maior a certeza do diagnóstico.

O fenômeno pode ser visualizado na Figura 2, na qual a variável de processo está em vermelho, o set point está em azul e a variável manipulada está em verde. A instabilidade do PCI e da vazão de gás natural no início dos gráficos desaparece quando colocamos em manual o controle de PCI, na região central do gráfico. Durante esse período todo o forno se estabiliza, inclusive o controle de pressão do forno: a pressão permanece estável e o controlador consegue valores de saída não saturados. Um teste específico de histerese na válvula da malha FIC1027 evidenciou a presença de uma histerese considerável, da ordem de 4,5%, conforme ilustrado na Figura 3.

Nessa estratégia de controle, o valor do PCI, variável de um controlador de PCI, é gerado por um cálculo, tendo como parâmetros a vazão total do gás misturado ( $V_{GAF}$ ), a vazão de Gás Natural ( $V_{GN}$ ), o PCI pressuposto do gás natural ( $PCI_{GN}$ ), o PCI pressuposto do Gás de Alto Forno ( $PCI_{GAF}$ ):

$$PCI_F = \frac{PCI_{GAF} V_{GAF} + PCI_{GN} V_{GN}}{V_{GAF} + V_{GN}}$$



Figura 2. Instabilidade do Controle de PCI.

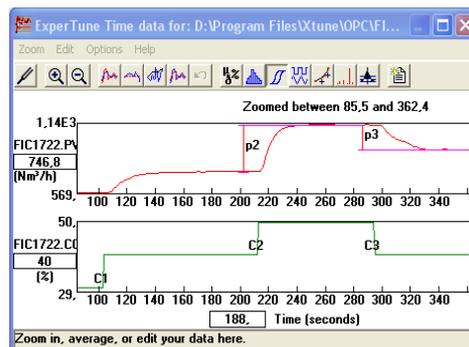


Figura 3. Detecção de histerese na válvula da malha de controle de vazão de gás natural – FIC1027.

Como a vazão de Gás de Alto forno não é medida diretamente, seu valor é inferido como sendo a diferença  $V_{GAF}=V_F-V_{GN}$ , onde  $V_F$  é a vazão total do gás misturado obtido pela soma das vazões obtidas nas zonas

$$PCI_F = \frac{PCI_{GAF}(V_F - V_{GN}) + PCI_{GN} V_{GN}}{V_F}$$

O resultado é utilizado como variável de processo de um controlador PID PCIC-1027. Um dos problemas desse controle é a introdução de um PID cuja variável é resultante de cálculos e cuja saída vai atuar como set-point de vazão de gás natural, vazão esta que será utilizada no próprio cálculo de PCI. Essa referência cruzada tem uma tendência natural à oscilação, que só não é catastrófica pelo fato de que os volumes de gás de alto-forno são significativamente maiores que aqueles de gás natural.

A cascata dos dois controladores (malhas FIC1027 e PCIC1027) associada aos problemas de histerese da válvula de controle de vazão de gás natural provocam oscilações constantes do PCI que afetam todo o forno. Propôs-se assim a

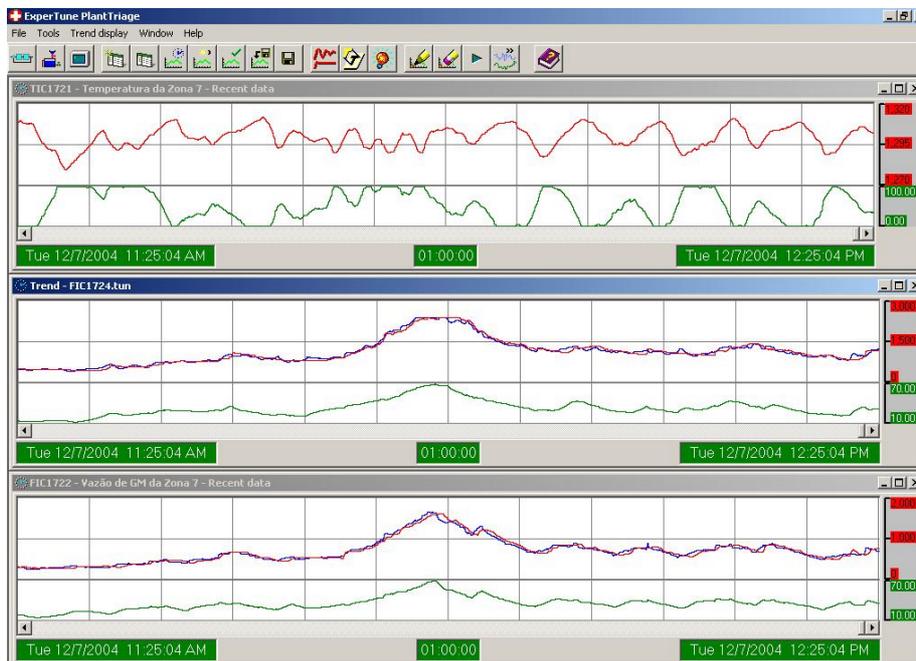
manutenção na válvula de controle de vazão de gás natural, a eliminação do controlador PID do PCI e determinação do set point da malha FIC1027 (vazão de gás natural) através de cálculo simples, usando o PCI desejado ( $PCI_F$ ) como um parâmetro da equação.

$$V_{GN} = V_F \frac{PCI_F - PCI_{GAF}}{PCI_{GN} - PCI_{GAF}}$$

Através da implementação das modificações propostas para a malha de controle de PCI e vazão de gás natural para a mistura, será possível estabilizar as malhas de temperatura, vazão e pressão do forno, eliminando as grandes oscilações que estas malhas sofrem.

#### 4.2 Duplo Limite Cruzado

Um outro índice de desempenho da Tabela 1, Erro médio absoluto (%T Avg abs error), apresenta também valores elevados para as malhas de temperatura do forno, indicando que o controle pode estar lento. Muito frequentemente, valores elevados de %T Avg abs error indicam controladores com sintonia muito lenta, o que leva à dificuldade em manter o set point. Observa-se na Figura 4 a diferença de velocidade do controle: enquanto a saída do controlador de temperatura se move rapidamente, as malhas escravas (vazões) se movem lentamente, em velocidade muito inferior. Parece que o controlador de temperatura foi sintonizado muito rápido devido à recorrência de erros, o que não trouxe vantagens pois viola o princípio da teoria de controle de que as malhas mestres devem ser notavelmente mais lentas do que as escravas.



**Figura 4.** Velocidade da malha de temperatura (mestre) e malhas de vazão de gás e ar (escravas) não estão compatíveis.

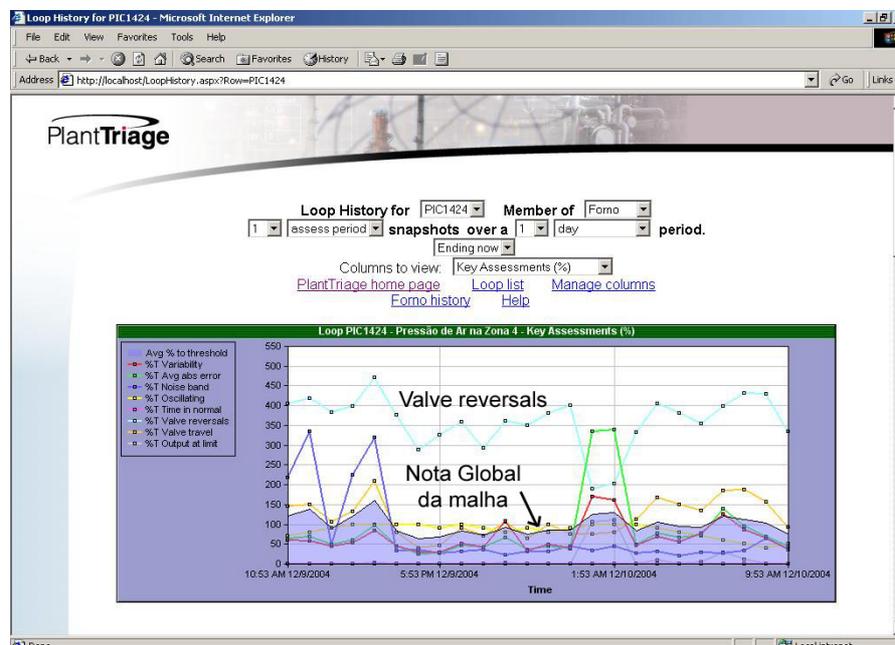
Além disso, foi detectado um problema na implementação das estratégias de duplo limite cruzado do forno, o que estava tornando a velocidade de resposta das malhas de vazão bastante lentas. Nessa estratégia, quando a demanda (saída do controlador de temperatura) é crescente, ou seja, em valores suficientemente altos,

o set-point de ar é dado pela vazão de gás multiplicado por 1,03 (parâmetro ajustável) e o set-point de gás é dado pela vazão de ar. Na demanda decrescente, o set-point de ar é dado pela vazão de gás e o set-point de gás é dado pelo produto da vazão de ar por 0,97. Isso tudo permite que, nos distúrbios relevantes, as vazões acompanhem uma à outra e vice-versa, respeitando as limitações de velocidade e acomodação. No entanto, como são usados fatores multiplicativos, a velocidade com que essas variáveis se movem é muito baixa em valores baixos de vazão e alta em valores grandes de vazão, dificultando muito o controle e sua sintonia.

A solução sugerida consiste em aplicar o duplo limite cruzado na forma mais usual. Ao invés de receberem fatores (x1,03 e x0,97) as informações de vazão recebem parcelas fixas (+3% e -3%) da faixa dos sinais. Esses valores são exemplos que poderão ser ajustados para melhorar a performance. Desta forma, a resposta das malhas de vazão se tornará mais rápida e linear.

### 4.3 Monitoramento Constante

Todas as malhas do forno estão sendo monitoradas continuamente pelo software de avaliação de desempenho. Desta forma, pode-se acompanhar os índices de desempenho de forma contínua e, assim que estes índices indicarem uma situação de degradação de desempenho, pode-se tomar ações para intervir na malha e solucionar o problema diagnosticado. A Figura 5, por exemplo, indica um desgaste excessivo de válvula (índice “valve reversals” elevado) que deve ser corrigido para aumentar a vida útil do equipamento e economizar energia, como descrito por Buckbee,<sup>(4)</sup> o qual quantifica a economia que pode ser feita através da redução da atividade do atuador.



**Figura 5.** Índice de reversão de válvula elevado (valve reversals) para a malha de pressão de ar na zona 4 do forno. A área colorida em cinza representa a nota média desta malha ao longo de um dia.

## CONCLUSÕES

Efetuando-se as alterações sugeridas pelo relatório final de auditoria de malhas do forno, foi estimado um retorno anual da ordem de R\$ 870.000,00, a ser comprovado

após a implementação das ações propostas pelo sistema. Este retorno se justifica através da redução de produção de carepa e economia de combustível.

A formação de carepa ocorre em função da presença de oxigênio na atmosfera interior do forno. Nas condições atuais de controle do forno, caracterizadas por forte oscilação da mistura dos gases e deficiência do controle da relação ar/combustível nos queimadores, há a presença de oxigênio na sua atmosfera interna medida e avaliada em cerca de 6% em volume, o que leva a estimar cerca de 30% de excesso de ar na queima em relação à estequiométrica. Em condições otimizadas de controle é ideal uma relação entre 5 e 10% de excesso de ar que levaria a cerca de 1 a 2% de oxigênio na atmosfera interna. A simples estabilização dos controles e sua sintonia, associada à otimização dos queimadores que operam em on-off poderiam reduzir a presença de oxigênio para níveis próximos de 2%, justificando a estimativa de redução de 10% na produção de carepa.

É possível também obter uma redução no consumo de gás natural da ordem de 2% através da simples correção da relação ar/combustível no forno, conforme descrito no item anterior. A equivalente redução do volume de fumos gerado e a perda de energia pela chaminé é mais que suficiente para justificá-lo. Segundo a experiência dos autores, a estabilização e otimização das malhas de controle de combustão tem gerado economias superiores a 5% em casos como este.

Além destes resultados, existem outros ganhos que não puderam ser mensurados ou que são intangíveis, mas com certeza são também expressivos dentro da gestão de produção e de manutenção dos sistemas do forno, entre eles: redução do tempo de parada para retirada de carepa do forno, aumento da vida útil das válvulas de controle, redução do consumo de energia elétrica, melhoria da qualidade do produto do forno o que irá reduzir, consideravelmente, alguns problemas do laminador que podem ser relacionados ao perfil térmico do aquecimento dos tarugos.

Finalmente, através da utilização de softwares de avaliação contínua de desempenho e diagnóstico automático, é possível manter o forno operando no seu patamar ótimo, garantindo os ganhos que podem ser obtidos através da otimização de suas malhas de controle.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 Fonseca, M. O., Seixas, C., Torres, B. S. (2004). Avaliação de Desempenho e Auditoria de Malhas de Controle, Revista Intech Brasil, no 63, págs. 32 a 35.
- 2 Torres, B. S., Fonseca, M. O., Passos, L. F., Faria, D. C. (2004a). Avaliação de desempenho, diagnóstico automático e sintonia de malhas de controle auxiliados por software dedicado, Revista Controle & Instrumentação, Ano 10, Número 98, Novembro, Págs. 69-75.
- 3 Torres, B. S., Fonseca, M. O., Aquino, R. D., Faria, D. C. (2004b). Aplicação de software dedicado para diagnóstico de malhas de controle, sintonia e redução de variabilidade de processos, 4º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação - ISA Show South America 2004, São Paulo/SP, Novembro.
- 4 Buckbee, George (2002). Control valves: the hidden cost of poor controller tuning, Control Magazine, April.

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1 PIDTuner and PlantTriage Manual – Expertune, 2005 – [www.expertune.com](http://www.expertune.com)

# CONTROL LOOP PERFORMANCE ASSESSMENT AND AUDITING ON AN INGOT HEATING FURNACE FOR LAMINATION<sup>1</sup>

*Paulo Vicente Correa*<sup>2</sup>  
*Bernardo Soares Torres*<sup>3</sup>  
*Bruno Walter Tschoepe*<sup>4</sup>

## **Abstract**

This paper presents the development of a control loop auditing project on an ingot heating furnace for lamination. Using new tools for monitoring and analyses of control loops it is possible to continually assess and get automatic diagnosis for these loops. This notably contributes to the auditing process and improvements. Practical examples and results about the use of on-line performance monitoring software and automatic problems diagnosis are also presented. Problems like hysteresis and stiction on control valves, control loop strategies implementation troubles, oscillations and its causes are exemplified. All the examples were acquired from an ingot heating furnace. Temperature, pressure and flow of air and gas are common loops of this furnace. By the use of software tools and control loop auditing many problems were found and solutions for these problems were suggested. These solutions involve programming and hardware changes. The benefits of this work are fuel economy on this furnace, dandruff reduction, and smaller process variability what can lead to a better operational efficiency and stability.

**Key-words:** Process optimization; Control loops; Ingot furnace; Lamination.

<sup>1</sup> *IX Process Automation Seminar, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, October 05-07th, 2005 – Curitiba – PR, Brazil.*

<sup>2</sup> *Electronic Engineer, Optimization department, ATAN Sistemas, Belo Horizonte, MG, Brazil.*

<sup>3</sup> *Electrical Engineer, M.Sc, Optimization department manager, ATAN Sistemas, Belo Horizonte, MG, Brazil.*

<sup>4</sup> *Engineer, PMI/M – Electronic instrumentation manager, V&M do Brasil S.A., Belo Horizonte – MG, Brazil.*