

BOAS PRÁTICAS NO CONTROLE DE FORNOS DE REAQUECIMENTO¹

*Fábio Barros de Carvalho²
Marcelo Versiani Carneiro³
Thiago Oliveira Rezende³*

Resumo

O objetivo deste trabalho é o de apresentar alguns “best practices” no controle regulatório de fornos de reaquecimento de tarugos. Utilizando cases reais desenvolvidos em diferentes indústrias siderúrgicas do país, serão descritas algumas implementações de sucesso que resultaram em melhoria das condições operacionais dos fornos, melhoria na qualidade do produto final e redução no consumo de recursos energéticos.

Palavras-chave: Fornos de reaquecimento; Otimização. Malhas de controle.

BEST PRACTICES ON REGULATORY CONTROL OF REHEATING FURNACES

Abstract

This work presents some best practices on the regulatory control of reheating furnaces. Exploring real cases developed in different steel industries in Brazil, successful implementations that have resulted in better operational conditions of the furnace, quality improvement of the final product and reduction in energetic resources consumption are presented.

Key words: Reheating furnace; Optimization; Control loop auditing.

¹ *Contribuição técnica ao XI Seminário de Automação de Processos, 3 a 5 de outubro, Porto Alegre-RS*

² *Engenheiro de Controle e Automação, Gerente de Projetos do Departamento de Otimização da ATAN Sistemas, Belo Horizonte – MG, Brasil.*

³ *Engenheiro de Controle e Automação, Departamento de Otimização da ATAN Sistemas, Belo Horizonte – MG, Brasil*

1 INTRODUÇÃO

Após a transformação do minério de ferro em gusa e em seguida em aço, é necessário dar forma ao material. Fornecer energia para que as peças se tornem mais maleáveis e possibilitem o processo de laminação é o papel dos fornos de reaquecimento.

As placas e tarugos provenientes das aciarias são transportadas pelo interior desses fornos atingindo temperaturas finais em torno de 1200 graus Celsius antes de seguirem para os laminadores.

Dois tipos de fornos são os mais difundidos: os fornos Pusher e o Walking Beams. A principal diferença entre os dois está na forma com a qual as peças são transportadas no interior do forno.

No forno Pusher, as peças são enfileiradas e em seguida empurradas. Dessa forma, não há espaço entre elas, já que ficam encostadas umas nas outras. Para cada peça enfornada, outra é desenfornada pela rampa de descarga.

No forno Walking Beams um sistema de vigas refrigeradas e acionadas por um sistema hidráulico é responsável pelo movimento da carga no interior do forno. Esse sistema possibilita maior flexibilidade para a operação, uma vez que, é possível deixar espaços entre as peças, alterar o número de peças no interior do forno e esvaziar o forno em caso de paradas.

Embora existam diferenças entre os tipos de fornos, as principais variáveis envolvidas no processo são semelhantes: vazão e pressão de ar e combustível; temperatura do forno, relação ar/combustível, PCI do combustível e pressão interna do forno. Malhas de controle PID são muito difundidas para impor o comportamento desejado a essas variáveis.

Em um nível superior encontram-se os sistemas de otimização que manipulam os SetPoints de temperatura do forno. Estes têm como objetivo respeitar os limites de aquecimento de cada tipo de aço e impor uma determinada curva de aquecimento ao material.

Os fornos são geralmente divididos em zonas de controle: zona de pré-aquecimento (função de iniciar o aquecimento do material), zona de aquecimento (zona que aquece o material efetivamente) e a zona de encharque (encarregada de homogeneizar a temperatura das peças).

Em cada uma dessas regiões, a temperatura deve seguir uma determinada referência para garantir a curva desejada de aquecimento do material. A topologia mais utilizada para esta finalidade é a mestre/escravo, na qual o controlador PID de temperatura calcula a referência para os controladores de vazão de ar e combustíveis. Juntamente a isso, é de suma importância manter a relação Ar/Combustível num valor estequiométrico bem definido: falta de ar provoca problemas de combustíveis não queimados (poluição e perda de parte do combustível que não se queima); excesso de ar produz um excessivo volume de fumaças que carrega energia para o meio externo, pois o ar atmosférico contém grande quantidade de Nitrogênio, que não é útil e carrega consigo calor.

A estratégia mais utilizada é a “Duplo limite cruzado” que busca atender à demanda com fluxos de combustível e ar, mantendo a relação estequiométrica e forçando os controles de ar e combustíveis a se respeitarem na sua dinâmica.

Finalmente, o controle da pressão do interior do forno é importante para o bom rendimento do processo. Valores altos de pressão geram perda excessiva de energia pelas portas e demais aberturas do forno, enquanto valores baixos permitem a entrada de ar no forno tornando a atmosfera interna oxidante, aumentando a

geração de carepa. O valor ideal da pressão deve estar ligeiramente acima da pressão atmosférica

Os trabalhos de melhoria do controle em fornos siderúrgicos geralmente seguem uma mesma metodologia. Ela começa com um levantamento de dados e diagnóstico (através de software dedicado) das malhas de temperatura, pressão e vazão de combustíveis do forno. Após análise dos dados, é realizada a otimização dos controles por diversos meios como: sintonia dos controladores; revisão das estratégias de controle; auditoria de sensores e atuadores; análise e revisão de parâmetros e práticas operacionais.

2 BENEFÍCIOS DE UM BOM CONTROLE

A realização de um bom controle das variáveis de um forno de reaquecimento trás muitos benefícios. Podemos destacar:

- **Qualidade do produto** - Um bom controle das temperaturas de cada uma das zonas do forno possibilita impor à peça a curva desejada de aquecimento. Seguir essa curva garante que o material alcance as características físicas desejadas.
- **Diminuição de perdas durante a laminação** - É importante que as peças atinjam a temperatura final desejada. Peças frias dificultam a laminação, podem causar perdas de material e problemas para os equipamentos. Por outro lado, peças quentes demais indicam desperdício de energia.
- **Economia de combustível** - Um forno equilibrado produz de forma mais eficiente, ou seja, gasta menos energia e produz mais. Equilíbrio na operação do forno significa: produção contínua (mínimo de paradas) e variáveis constantes (principalmente Relação Ar/Combustível, temperaturas das zonas e pressão do forno).
- **Menor formação de carepa e diminuição da emissão de poluentes** - Um bom controle da relação Ar/Combustível proporciona: a redução da formação de carepa, já que mantém o excesso de oxigênio em patamares aceitáveis (atmosfera menos oxidante); e a diminuição da emissão de poluentes pois, garante a queima completa de todo o combustível utilizado.
- **Funcionamento em automático** - Um forno bem controlado funciona com o mínimo de intervenções da operação. Isso possibilita menor discrepância entre os perfis de operação e coloca o operador em uma posição mais produtiva dentro da empresa, já que ele não precisa mais acionar manualmente os instrumentos.

3 PASSOS PARA UM BOM CONTROLE

Para que se obtenha um bom resultado em termos de controle regulatório para qualquer processo, é necessário que se observem alguns pontos fundamentais:

- Um bom controle do processo se inicia na fase de projeto, ou seja, é necessário que se tenha sensores e atuadores bem especificados e dimensionados, além de uma instalação correta dos mesmos.
- Ainda na fase de projeto, é necessário que a equipe de operação, de processo e de engenheiros de controle definam juntos as melhores estratégias de controle a serem implementadas, ou seja, definir o melhor emparelhamento PV / MV, estratégias que se adequam melhor, tais como Duplo Limite Cruzado, Feed Forward, Split Range, etc.

- Programar de maneira correta os PIDs no PLC, levando em consideração, por exemplo, o período de amostragem do sinal real.
- Com tudo programado e implementado corretamente, deve-se ter instaladas ferramentas capazes de avaliar, diagnosticar e propor sintonias para as malhas de controle. Essas ferramentas permitem, além de uma avaliação contínua das malhas, uma enorme redução no tempo de comissionamento dessas malhas.
- Com o processo operando normalmente, parte-se para a fase de monitoração contínua do desempenho do processo visando mantê-lo dentro de limites desejados.

Nos itens a seguir serão detalhados alguns dos passos acima citados, com exemplos retirados de casos de sucesso ocorridos em diferentes fornos siderúrgicos do país.

3.1 Auditoria e Sintonia de Malhas

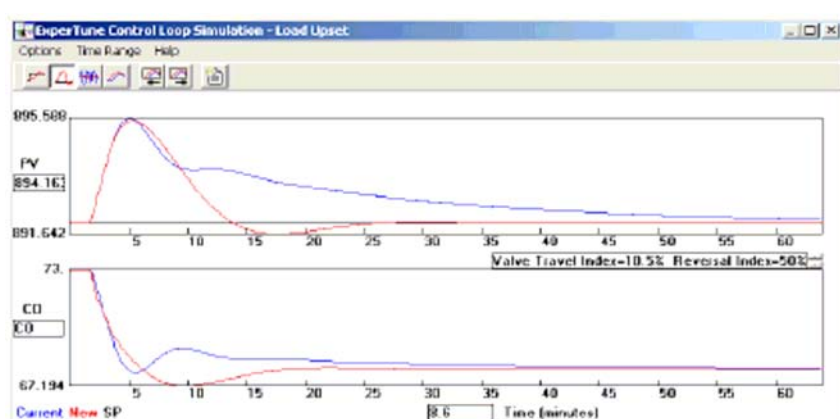
A auditoria das malhas de controle visa, por exemplo, a redução da variabilidade do processo, permitindo que se opere com *set-points* mais próximos aos limites de especificação, aumentando assim o lucro e/ou a produção.

A seguir, serão apresentados dois casos reais de melhorias alcançadas com a auditoria de malhas de controle em fornos de reaquecimento.

CASO 1- A sintonia das malhas de temperatura de um forno walking-beam foi modificada de forma a ajustar os tempos de resposta à mudanças de carga que eram superiores a uma hora.

A Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 1 mostra uma simulação da resposta do controle a um distúrbio na temperatura. Em azul, a resposta aplicando-se os parâmetros originais do PID, o tempo de restabelecimento da temperatura é aproximadamente 1 hora. Em vermelho, é mostrado a simulação da resposta ao mesmo distúrbio porém aplicando-se os novos parâmetros de sintonia. Conforme estimado, o tempo de restabelecimento foi reduzido para 20 minutos, ou seja, um controle três vezes mais rápido.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 1– Simulação de resposta à distúrbio, em azul a resposta original que demorava cerca de uma hora para restabelecimento e, em vermelho, a resposta com o nova sintonia.

Após a implementação da nova sintonia, os dados da simulação foram satisfatoriamente confirmados com dados reais do processo. A Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 2 mostra o comportamento da malha durante um distúrbio na temperatura que ocorre devido ao carregamento do forno. O tempo de restabelecimento é bem próximo dos 20 minutos previstos.

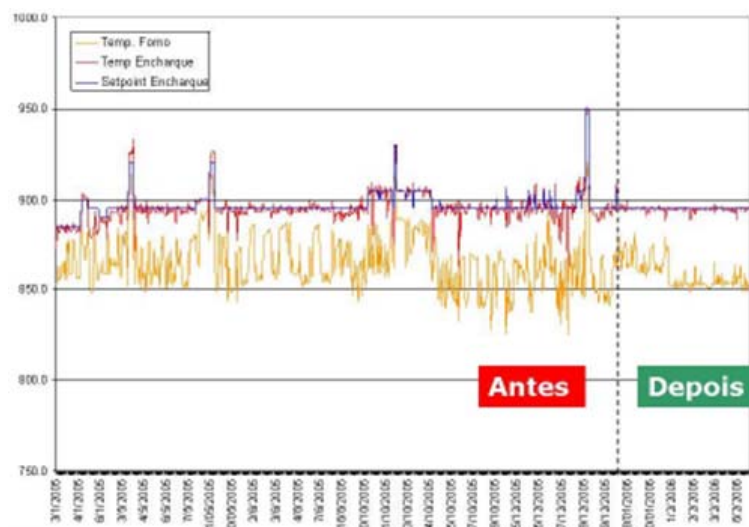


Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 2 – Exemplo de rejeição à perturbação durante carregamento do forno após implementação da nova sintonia

A Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 3 compara a tendência do controle de temperatura na zona de encharque antes e depois das mudanças. Pode ser visto nessa figura que antes da otimização a temperatura do forno sofria variações bem maiores que as registradas após o trabalho.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 3 - Melhoria no controle de temperatura

Tal melhoria no controle de temperatura criou uma margem para diminuição de 5°C no set-point, que por sua vez representa uma redução de aproximadamente 5% no consumo de gás natural do forno.

3.2 Revisão de Estratégias de Controle

A revisão da estratégia de controle se faz necessária quando os elementos de controle como um todo não apresentam um bom desempenho. Neste caso é preciso

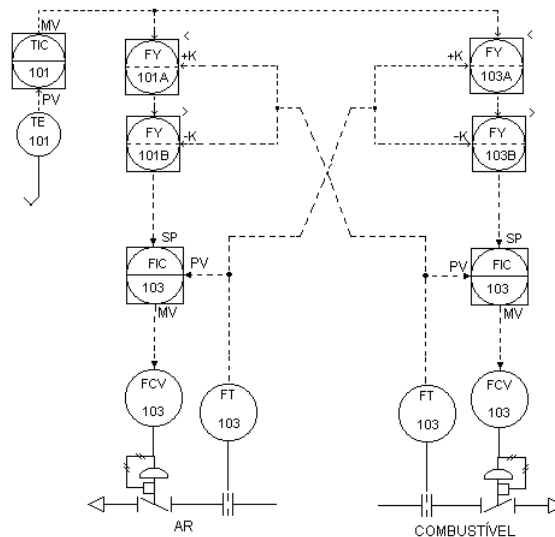
rever os emparelhamentos PV/MV, as possíveis interações entre os controles de cada zona, o funcionamento do duplo limite cruzado etc.

CASO 2– este caso retrata a elaboração de uma nova estratégia para o controle de temperatura das zonas de um forno pusher que utiliza dois combustíveis distintos.

As temperaturas das zonas do forno são as principais variáveis do processo. A saída de cada controlador de temperatura representa a demanda de potência da zona, que é “traduzida” em termos das vazões de ar e de combustível necessários para que a temperatura atinja seu valor desejado.

Numa estratégia convencional, a vazão de ar seguiria a solicitação da demanda, e a vazão de combustível seria simplesmente uma proporção da vazão de ar, ou vice-versa. Neste caso tem-se o inconveniente de não serem atendidas as proporções desejadas quando há perturbações transitórias (o ar e o combustível podem ter diferentes dinâmicas, velocidades, e tempos para se acomodarem), ou quando há algum problema com os elementos de controle (falha, agarramento, etc.).

A estratégia de duplo limite cruzado busca atender à demanda com fluxos de combustível e ar, mantendo a relação estequiométrica e forçando os controles de ar e de combustíveis a levarem em consideração a sua dinâmica. Uma ilustração da técnica é mostrada na figura a seguir, onde a relação que transforma ar em combustível e vice-versa foi considerada igual à unidade (1 para 1).



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 4- Duplo Limite Cruzado para um combustível.

Porém, a temperatura da zona deveria ser controlada a partir de dois combustíveis distintos: óleo e gás. Sendo assim, apresenta-se a seguinte questão: uma mesma temperatura pode ser alcançada consumindo-se, por exemplo, 60% de óleo e 40% de gás ou 20% e 80% de gás. Dentre essas duas situações, a segunda é preferível, uma vez que o custo unitário do óleo é maior do que o custo unitário do gás.

Portanto, três objetivos deveriam ser compatibilizados:

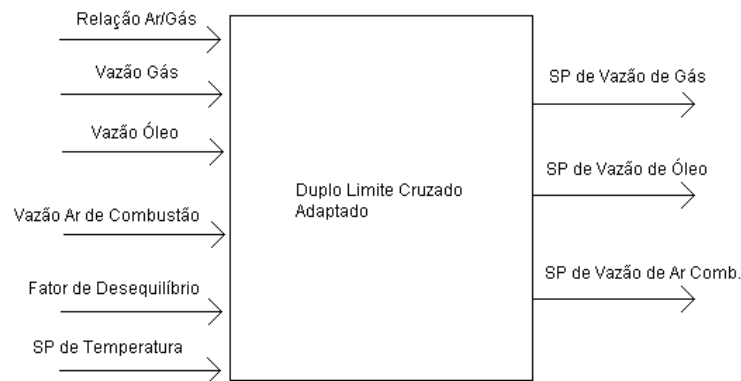
1. O objetivo principal do sistema é manter o erro entre a temperatura desejada e a temperatura obtida igual a zero;
2. A mistura de óleo e gás deve ser particionada, de forma que a soma deles sempre atendam à demanda da temperatura do forno: isso significa que se um deles é limitado por qualquer motivo, o outro deve complementar a necessidade;

- Deve-se ter uma tendência natural de queimar o máximo de gás e o mínimo de óleo, por questão de economia.

Para atender esses objetivos, a estratégia de Duplo Limite Cruzado teve que ser adaptada para dois combustíveis.

A nova estratégia, além de respeitar os objetivos mencionados, ainda considera a seguinte situação: quando um pedido de temperatura não estiver sendo atendido por alguma limitação do processo (por exemplo, limitação do ar de combustão), a estratégia naturalmente irá abandonar temporariamente a questão de economia, aumentar a demanda pelo óleo, reduzir a demanda pelo gás e atingir a temperatura desejada, que é o primeiro objetivo do sistema de controle.

A relação de entrada e saída dessa estratégia pode ser vista na Figura a seguir.



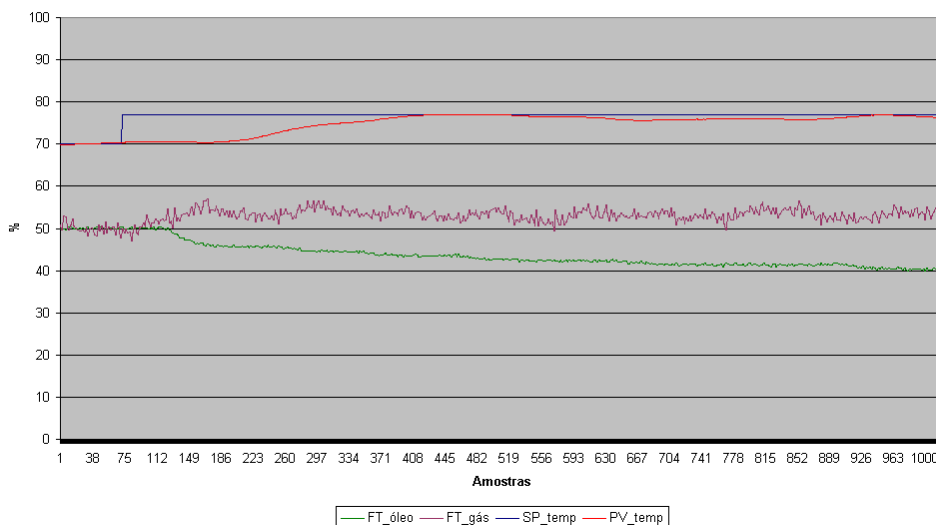
Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 5- Relação de entradas e saídas do Duplo Limite Cruzado Adaptado

O parâmetro “Fator de Desequilíbrio” pode ser entendido como a taxa de “afastamento” das vazões dos dois combustíveis. Quanto maior esse fator, mais rápida será a redução da vazão de um combustível e o aumento da vazão do outro.

O resultado dessa estratégia pode ser vista na figura a seguir, onde há uma mudança no *set point* de temperatura, há uma maior demanda de potência e então, naturalmente, o sistema aumenta a vazão de gás e reduz a vazão de óleo.

Duplo Limite Cruzado - Fator de Desequilíbrio



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 6- Duplo Limite Cruzado Adaptado – redução da vazão de óleo e aumento da vazão de gás buscando atender a temperatura desejada com a maior economia

O projeto de modernização deste forno de reaquecimento desencadeou em uma redução anual de 1,5% na formação de carepa e de 34% no consumo de óleo. Boa parte deste percentual de redução energética correspondeu à implantação da estratégia de controle descrita.

3.3 Manutenção em Instrumentos e Válvulas

A visualização das variáveis do processo pressupõem o uso de instrumentos bem dimensionados e com características bem conhecidas. Os instrumentos geralmente encontrados nos fornos de reaquecimento são: placas de orifício, termopares e medidores de pressão.

Uma boa medição é fundamental para o correto funcionamento das malhas de controle do forno. Abaixo estão listados alguns problemas comumente encontrados na instrumentação dos fornos de reaquecimento:

- a implementação incorreta da correção por temperatura e pressão da medição de vazão de combustíveis e ar por meio de placas de orifício leva a valores incorretos da relação ar/combustível;
- a instalação de termopares em posições inadequadas ao longo do forno leva a medições de temperatura que não representam bem o estado da atmosfera do forno;
- o uso de filtros com constante de tempo mal dimensionadas mascara o correto valor das medições;
- o lançamento inadequado dos cabos de sinal dos sensores eleva muito o ruído de medição.

A atenção deve ser a mesma com relação às válvulas. Problemas implicam diretamente no desempenho dos controles, gerando gastos excessivos de energia e problemas de qualidade. Abaixo seguem alguns problemas comuns:

- Válvulas que não conseguem abrir ou fechar totalmente causam saturação nas malhas e conseqüentemente alto erro de controle.
- O agarramento das válvulas gera dificuldade de controle e oscilações. Isso impede que o forno alcance um estado de equilíbrio;
- As válvulas precisam responder rapidamente às requisições. Resposta lentas implicam em controles que não conseguem rejeitar as perturbações de processo.

CASO 3- O caso seguinte mostra a identificação de problemas no atuador da malha de vazão de ar de um outro forno de reaquecimento. O problema no atuador causa um erro significativo entre a referência de vazão e a vazão real. Esse erro é propagado para outras malhas do forno, como as de vazão de gás e de temperatura, que estão inseridas dentro da mesma estratégia de controle – o duplo limite cruzado.

A tabela a seguir apresenta o diagnóstico de oscilação por válvula para a malha de vazão de ar. Esse diagnóstico indica problemas no atuador, tais como folga e agarramento.

Tabela 1- Diagnóstico de problemas no atuador

Loop	Description	Oscillating	Osc - Valve	Osc - Tuning	Osc - Load
FIC201	Vazão de Ar na Zona 2	100	98.33	0	1.667

Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

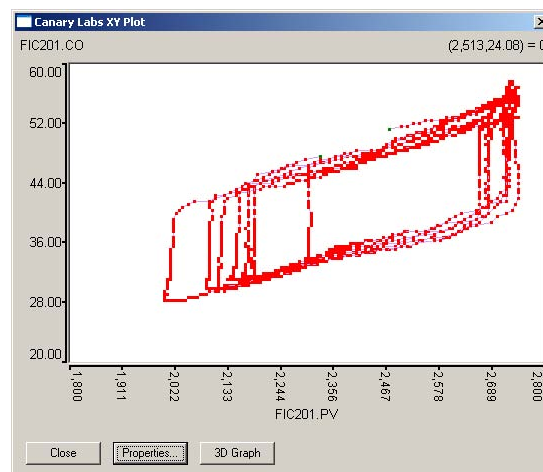
Na figura a seguir, pode-se verificar que esse provável agarramento está afetando o desempenho da malha, que leva mais de 1 minuto para atingir o SP quando este é alterado. Além disso, pode-se ter uma indicação de um agarramento de mais de 10%.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 7– Erro causado pelo agarramento excessivo na válvula de controle de vazão de ar

Como essa malha é escrava da malha de temperatura da Zona 2, o problema se torna ainda mais grave, uma vez que o SP varia constantemente. O gráfico a seguir, MV versus PV, evidencia mais de 10% de folga/histerese na válvula.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 8- Curva característica de problema no atuador

Neste caso, não há nada que se possa fazer até que seja realizada a manutenção e eliminação do agarramento desta válvula.

3.4 Revisão de Práticas Operacionais

Existem algumas práticas operacionais que podem agir no sentido contrário do bom desempenho dos fornos. Muitas vezes o processo já sofreu diversas modificações que tornam aquelas práticas obsoletas mas, por uma questão de

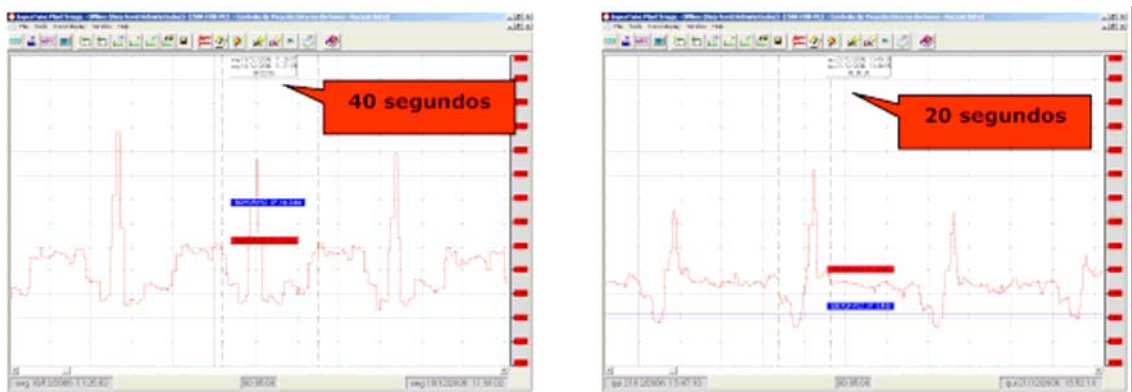
desatenção ou inércia, as práticas continuam sendo aplicadas como nos tempos passados.

Como exemplo podemos citar operação em modo manual; escolha do fator de proporcionalidade ar/combustível; escolha dos setpoints; diferença de padrões de operação entre turnos; entre outros.

CASO 4 – Em um determinado forno de aquecimento verificou-se que o tempo em que as portas permaneciam abertas após um enformamento ou desenformamento era muito grande. Isso causava uma perda desnecessária de energia.

Para diminuir esse tempo, as condições para o fechamento das portas foram alteradas. A Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 9 mostra a variação da pressão interna do forno com o ciclo de enformamento e desenformamento. O tempo de abertura de portas foi reduzido em 50% reduzindo a influência dessa perturbação no processo e conseqüentemente a aumentando a eficiência energética do forno.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA

Figura 9– Pressão do forno antes e depois da alteração no fechamento de portas

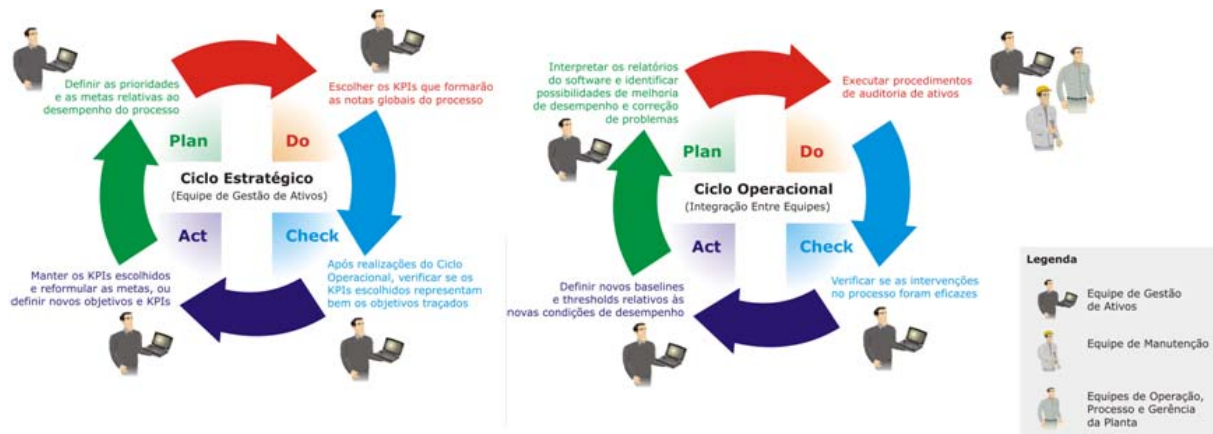
3.5 Ciclos de Melhoria Contínua

Tanto no caso dos fornos siderúrgicos como em qualquer processo que está sendo otimizado, não basta alcançar momentaneamente o bom desempenho, é preciso sustentar esse patamar de desempenho. Dentro desse contexto, uma boa iniciativa é a utilização de ciclos PDCA (Plan, Do, Check, Act), método de melhoria contínua que já vem sendo aplicado com sucesso em diversas empresas).

Quando se considera que as malhas de controle de um forno de reaquecimento representam ativos daquela empresa (o que é verdade), podem ser identificados dois ciclos complementares e distintos na gestão desses ativos. Estes ciclos podem ser denominados como Ciclo Estratégico e Ciclo Operacional. A

Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA.

Figura 10 ilustra estes dois ciclos.



Fonte: ATAN Ciência da Informação LTDA.

Figura 10 – Ciclos Modelo PDCA para Gerenciamento de Ativos

É fácil perceber que os dois ciclos funcionam em uma espécie de “cascata”, sendo que o Ciclo Estratégico (executado no médio-longo prazo) é alimentado pelos resultados do Ciclo Operacional (executado no curto prazo).

No Ciclo Operacional, a equipe irá planejar as intervenções necessárias na planta e definirá as ações a serem tomadas para a melhoria do comportamento dos ativos dentro dos KPIs monitorados. As ações propostas poderão envolver atividades a serem executadas no curto prazo e também no longo prazo. Estas ações poderão ser empreendidas pela própria equipe de gestão de ativos ou pelas equipes de manutenção, de operação, de processo e até mesmo de gerência da planta. Realizadas as alterações necessárias, a equipe de gestão de ativos irá verificar e medir se as ações empreendidas resultaram na melhoria dos KPIs e poderá, inclusive, definir novas metas e valores limites (Baselines e Thresholds) para melhorar ainda mais o comportamento do ativo em uma nova iteração do ciclo operacional.

4 CONCLUSÕES

Sob o ponto de vista operacional, os resultados da aplicação das boas práticas citadas no controle de fornos de reaquecimento envolvem uma redução significativa na variabilidade da temperatura e também da relação ar/combustível. Além disso, após as implementações, é comum observar uma redução nas intervenções e operações em modo manual nos fornos.

Sob o ponto de vista de negócio, com uma menor variabilidade dos controles, alcança-se margem para reduções de em média 5% no consumo de combustível. Além de uma melhoria na qualidade do produto uma vez que, com um funcionamento mais balanceado dos fornos, tem-se uma maior uniformidade nos perfis de temperatura ao longo das peças enfiadas.

BIBLIOGRAFIA

- 1 HAUCK, G.A.C; LAIA L.L. Fornos de reaquecimento. **Apostila do Curso Fornos de reaquecimento - ABM**. São Paulo, Maio, 2007.
- 2 BEGA, E.A. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**. São Paulo: Interciência, 2003. 180p.