

ESTUDO DE CASO DA MALHA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR QUENTE DO ALTO FORNO 1 DA ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

Thiago Follador Amorim²
Jefferson Alvarenga Lima³
Alessandro Mattedi⁴

Resumo

Neste artigo é apresentada uma metodologia para detecção e correção das oscilações na malha de controle de temperatura do ar quente enviado para o Alto Forno 1 da Arcelor Mittal Tubarão. Para a correção dos problemas foram utilizadas técnicas de análise de falhas e diferentes estratégias de sintonia de controladores. Para validação dos resultados obtidos, foram utilizadas ferramentas estatísticas. O trabalho descreve o funcionamento da malha de controle de temperatura de ar quente, possibilitando, então, a identificação e eliminação das causas responsáveis pela variação da temperatura, como também melhorias da malha de controle.

Palavras-chave: Controle de processos; Forno siderúrgico; Identificação de sistemas.

BLAST FURNACE 1 - CASE OF TEMPERATURE CONTROL LOOP OF HOT BLAST

Abstract

This article presents a methodology for detecting and correcting for variation in the loop temperature control of hot air sent to the blast furnace 1 Arcelor Mittal Tubarão. For the correction of problems techniques were used for failure analysis and different strategies for tuning controllers. To validate the results obtained, we used statistical tools. This paper describes the operation of the control loop of hot air temperature, allowing then to identify and eliminate causes for the variation in temperature, as well as improvements of the control loop.

Key words: Process control; Blast furnace; Identification system.

¹ Contribuição técnica ao 14º Seminário de Automação de Processos, 6 a 8 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Especialização em Instrumentação e Controle de Processos /UFES, Engenharia de Automação e Controle/UCL, Técnico em Eletrotécnica/CEFET-ES, atuando como Especialista em Automação de Altos-Fornos/ArcelorMittal Tubarão (E-mail: thiago.follador@arcelor.com.br).

³ Especialização em Instrumentação e Controle de Processos /UFES, Engenharia de Produção/FAESA, Tecnologia Mecânica/UFES, Técnico em Instrumentação Industrial/SENAI, Técnico em Mecânica/CEFET-ES, atuando como Engenheiro de Manutenção Eletro-Eletrônica/LLX Minas Rio (E-mail: jefferson.lima@llx.com.br).

⁴ Departamento de Engenharia Elétrica – UFES, Av. Fernando Ferrari, 514 CEP 29075-910 Vitória-ES (E-mail: alessandro@ele.ufes.br).

1 INTRODUÇÃO

O Alto Forno é um reator metalúrgico que tem a função de transformar as matérias primas - *sinter*, minérios, pelotas, fundentes e coque - em gusa líquido, para posterior fabricação de aço. A principal fonte de aquecimento desse processo é por meio do calor sensível vindo do ar pré-aquecido em regeneradores.⁽¹⁾

O controle térmico desse processo é de suma importância para evitar a descida de minérios fundidos, e assim garantir a homogeneidade do gusa produzido. Nestes últimos anos podem-se citar alguns importantes trabalhos relacionados a modelagem e controle de processos de combustão de alto fornos, mostrando a relevância desse assunto no meio acadêmico.⁽¹⁻⁶⁾

Este trabalho mostra as melhorias implementadas no sistema de controle de temperatura da planta do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão, mais especificamente no controle de temperatura do ar quente dos regeneradores. O mesmo é composto por várias malhas de controle independentes, entre elas, a malha de controle da temperatura do ar quente, que é responsável pelo aquecimento do ar soprado para o interior do Alto Forno (AF), até um valor de temperatura ideal para a produção do gusa líquido. As estratégias de controle visam reduzir a variabilidade da temperatura nos regeneradores e, por conseguinte, minimizar variações da pressão do AF, com intuito de melhorar a qualidade do gusa produzido.

Uma série de procedimentos de sintonia de malhas de controle é empregado com base em técnicas de identificação de sistemas e sintonia de controladores PID (ações Proporcional, Integral e Derivativa). O intuito principal é a redução da variabilidade da temperatura do ar quente durante as trocas de estado dos regeneradores. E conseqüentemente reduzir a variação do nível térmico do Alto Forno 1, para no máximo ± 10 °C, que é a variação aceitável para a operação.

2 PROCESSO DOS REGENERADORES

O Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão possui quatro regeneradores que se revezam na função de suprir a demanda de ar quente do Alto Forno. Cada regenerador é composto basicamente por câmaras de regeneração e de combustão, bem como um conjunto de válvulas. Sendo que o processo de aquecimento do ar soprado ocorre por meio de três modos de funcionamento: combustão, ventilação e fechado.

Combustão - consiste em aquecer a parede de refratário localizada no interior da câmara de regeneração durante um período previamente determinado para que, em seguida, o regenerador possa iniciar o processo de ventilação.

Ventilação - consiste em aquecer o ar a ser enviado para o interior do Alto Forno. O ar frio é injetado na base da câmara de regeneração à uma temperatura de aproximadamente 178°C, que percorre toda câmara retirando calor do refratário aquecido até chegar à válvula de ar quente, sendo enviado para o interior do Alto Forno com uma temperatura de aproximadamente 1.250°C (ver figura 1).

Fechado – ocorre quando o regenerador encontra-se isolado do processo ou fora de operação.

A Figura 1 ilustra a câmara de mistura e os elementos relacionados a malha de controle do processo de ar quente, que é composta basicamente por: - uma válvula controladora de vazão, instalada na linha de ar frio de cada um dos regeneradores denominada CB, responsável pelo controle da vazão de ar frio do regenerador em

ventilação; - uma válvula controladora de vazão comum aos quatro regeneradores denominada MB, responsável pelo controle da vazão de ar frio injetado na câmara de mistura; - termopares, pirômetros e controladores internos ao sistema de controle distribuído. Na câmara de mistura pode-se corrigir o valor real da temperatura do ar quente no valor de referência.

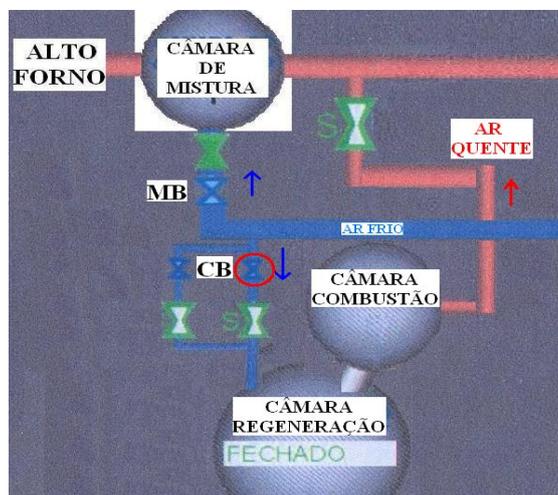


Figura 1. Processos de aquecimento de regeneradores.

O valor de referência (*set-point*) da temperatura do ar quente é ajustado pelo operador no controlador de temperatura.

Normalmente os regeneradores trabalham em sopro paralelo, ou seja, dois regeneradores em combustão e dois em ventilação. Neste modo as principais responsáveis pelo controle de temperatura do ar quente são as válvulas CB, exceto no momento das trocas de regeneradores quando a válvula MB contribui para o controle. Para facilitar o entendimento do controle da temperatura do ar quente em sopro paralelo é considerada a seguinte situação inicial: acabou de ser realizada uma troca de regeneradores, a válvula MB está parcialmente aberta, dois regeneradores estão em ventilação sendo que um deles acabou de entrar e os outros dois regeneradores estão em combustão.

As válvulas CB dos dois regeneradores que estão em combustão e a do que acabou de entrar em ventilação estão fechadas e a válvula CB do regenerador que está a mais tempo em ventilação está totalmente aberta.

Se a temperatura do ar quente estiver maior que o valor de referência, a válvula MB irá abrir em controle injetando mais ar frio na câmara de mistura, visando diminuir a temperatura. Caso a temperatura esteja menor que o valor de referência, a válvula MB irá fechar sob controle injetando menos ar frio na câmara de mistura, visando aumentar a temperatura do ar quente. Com os minutos passando, e caso não ocorra nenhum aumento de temperatura, a válvula MB continua fechando gradativamente, visando manter constante a temperatura do ar quente, visto que os regeneradores vão perdendo calor para o ar soprado.

Se houver comando de troca antes do fechamento total da válvula MB, a válvula CB do regenerador que está a menos tempo em ventilação, que está fechada, é aberta totalmente aumentando a temperatura do ar quente, visto que este regenerador está com o domo (topo da câmara de regeneração) mais aquecido que o outro que está ventilando. Para compensar essa situação é enviado comando para a válvula MB abrir em alta velocidade, até uma abertura calculada, visando manter a temperatura do ar quente constante.

Quando a válvula CB do regenerador que está a menos tempo em ventilação estiver totalmente aberta, a válvula CB do regenerador que está a mais tempo em ventilação, e está saindo de ventilação, fechará totalmente.

Entretanto, se não houver comando de troca até o fechamento total da válvula MB, é contado um tempo de aproximadamente 20 segundos e após este tempo o controle da temperatura do ar quente passa a ser realizado pelas válvulas CB. Neste caso, a válvula CB do regenerador que está a menos tempo em ventilação irá abrir em controle visando manter a temperatura constante. Se houver comando de troca antes da abertura total da mesma, esta é aberta totalmente, a válvula MB abre em alta velocidade e quando a válvula CB estiver totalmente aberta, a válvula CB do regenerador que está a mais tempo em ventilação e está saindo de ventilação é fechada totalmente (Figura 2).

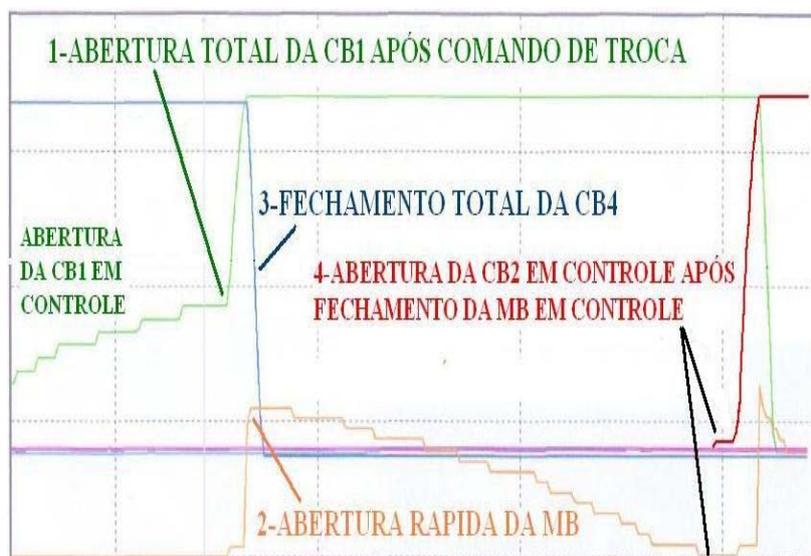


Figura 2. Posicionamento das válvulas durante a troca.

Se não houver comando de troca até a abertura total da válvula CB do regenerador que está a menos tempo em ventilação, a válvula CB do outro regenerador em ventilação começa a fechar em controle mantendo a temperatura constante. Se houver comando de troca neste momento, a válvula MB abre em alta velocidade e a válvula CB que estava fechando gradativamente é totalmente fechada. Se não houver comando de troca, quando a válvula CB estiver fechando em controle e atingir uma abertura igual ou inferior a 50%, é enviado um sinal para o programa de troca. Se estiver selecionada troca por extensão, o sistema de controle comanda a troca dos regeneradores. Caso seja gerado comando de troca, a válvula CB é totalmente fechada e a MB abre em alta velocidade até uma abertura calculada, repetindo o ciclo para os novos regeneradores em ventilação (Figura 3).

2.1 Desvio no Controle de Temperatura nas Trocas de Regenerador

Através da verificação do posicionamento das válvulas de controle durante a troca, utilizando curvas de tendência, foi identificado que a abertura da válvula MB não estava de acordo com a regra operacional. Após o comando de troca e abertura total da válvula CB2, a MB abriu em alta velocidade e fechou instantaneamente ao invés de fechar em controle, ocasionando os picos de temperatura descritos anteriormente.

Após o fechamento instantâneo, a válvula MB abriu em controle em função da elevação da temperatura e após a estabilização da temperatura conforme o valor de referência, a mesma fechou em controle conforme filosofia operacional. A Figura 3 mostra o comportamento incorreto da válvula MB descrito.

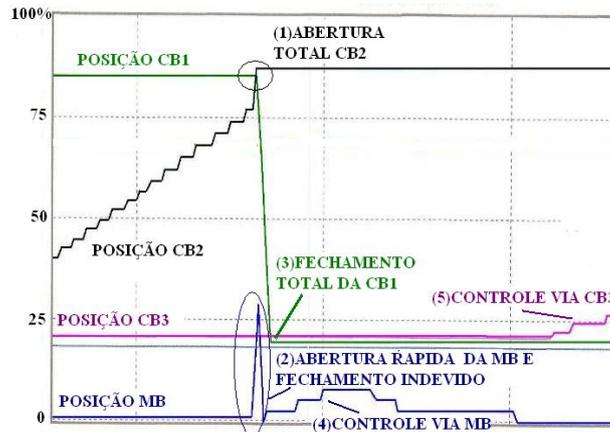


Figura 3. Posicionamento anormal das válvulas durante a troca.

O fechamento indevido da MB era causado por falha na programação. Durante a abertura rápida da MB a saída do controlador de temperatura era bloqueada, não permitindo a atualização da saída conforme a posição real da válvula (rastreamento), provocando o fechamento indevido da MB quando o controle era devolvido para o controlador.

Foi elaborada uma lógica visando atualização da saída do controlador conforme posição real da válvula, evitando o fechamento indevido da MB após a abertura rápida.

2.2 Verificação dos Elementos de Controle e Automação

Através dos testes de movimentação foi verificado que o freio do acionamento da válvula MB estava desajustado, impossibilitando o posicionamento adequado da válvula. Além disso, foi constatado que os blocos conversores de pulsos (posicionadores) das válvulas CB e MB, utilizados na lógica de programação, estavam desajustados provocando operação excessiva das mesmas durante a tentativa de posicionamento. Após ajuste do freio da MB e posicionadores das válvulas foram aplicados novos testes de movimentação e confirmado o perfeito funcionamento dos transmissores de posição, acionamentos das válvulas, circuito de comando elétrico e posicionadores.

2.3 Oscilação na Faixa de Controle de Ar Quente no Processo de Ventilação dos Regeneradores

Após análise da medição de temperatura, foi identificada a existência de um erro estacionário em torno de 5 °C (*offset*) (Figura 4).

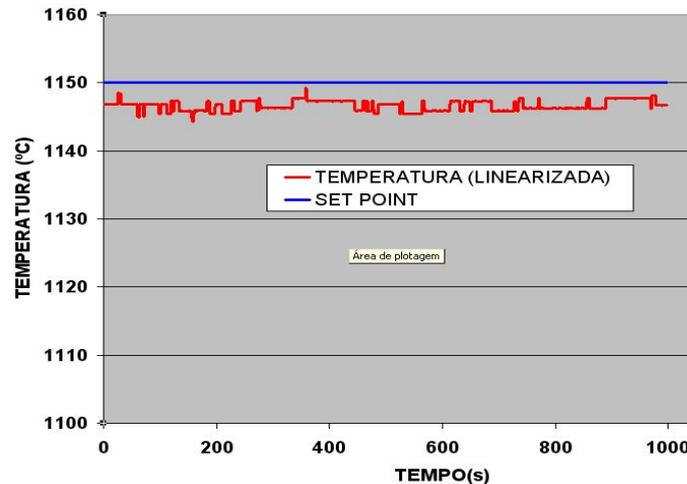


Figura 4. Medição da temperatura do ar quente após estabilização.

O erro estacionário existente (aproximadamente 5°C) era causado devido lógica de programação que bloqueava o controlador para pequenos valores de desvio (banda morta). O erro estacionário existente foi reduzido para 2°C após redução do valor de desvio que bloqueava o controlador.

2.4 Verificação da Atualização dos Desenhos/Documents

Os desenhos e documentos relacionados ao controle de ar quente foram verificados e não foram encontrados desvios nos mesmos.

2.5 Verificações dos Procedimentos de Manutenção

Verificados os padrões de calibração, manutenção e inspeção e não foram encontrados desvios nos mesmos.

2.6 Verificação da Metodologia de Controle Antes e Após a Automação

Após estudo detalhado da lógica de programação responsável pelo controle de temperatura do ar quente, foi identificado que a abertura da MB estava sendo realizada por tempo fixo e que a lógica para abertura em função do cálculo empírico estava desabilitada. Logo, a MB abria sempre o mesmo percentual de abertura durante a troca, não considerando a reserva térmica de cada regenerador. Baseado em relatórios elaborados durante a transferência do sistema de controle analógico para o digital e estudos do antigo sistema de controle (analógico), foi constatado que o calculador analógico responsável pela abertura rápida da MB foi substituído por um bloco comparador no SDCD. O calculador analógico possuía uma escala de -10% a +10% e quando o valor do cálculo empírico atingia 4%, a válvula MB parava de abrir rapidamente e o controlador analógico assumia.

A escala deveria ser convertida para 0 a 100% no SDCD e o valor do comparador deveria ser ajustado em 70%, porém estava ajustado em 4%, provocando abertura excessiva da MB e queda abrupta da temperatura durante a troca (Figura 5). Logo, o cálculo foi substituído por tempo fixo e a causa real do problema não foi corrigida.

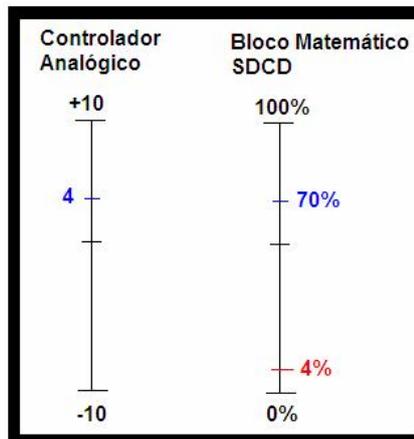


Figura 5. Conversor analógico e digital.

Após ajuste do comparador em 70% (valor original convertido), foi desabilitada a lógica de abertura por tempo fixo e habilitada a lógica original de controle, ou seja, abertura por cálculo empírico. A Figura 11 mostra os resultados após a normalização do software.

3 CONTROLADORES CONTÍNUOS NA TROCA DOS REGENERADORES

A Figura 6 mostra a curva de tendência da temperatura do ar quente, que apresenta uma variabilidade considerável (em torno de 20 °C em relação ao *set-point*). Os três maiores picos de temperatura (1.129°C, 1.122°C e 1.122.3°C) são variações que ocorrem durante a troca de regeneradores. Por isso a importância de aplicação e sintonia de controladores PID no procedimento de troca dos regeneradores, a fim de reduzir a variabilidade.

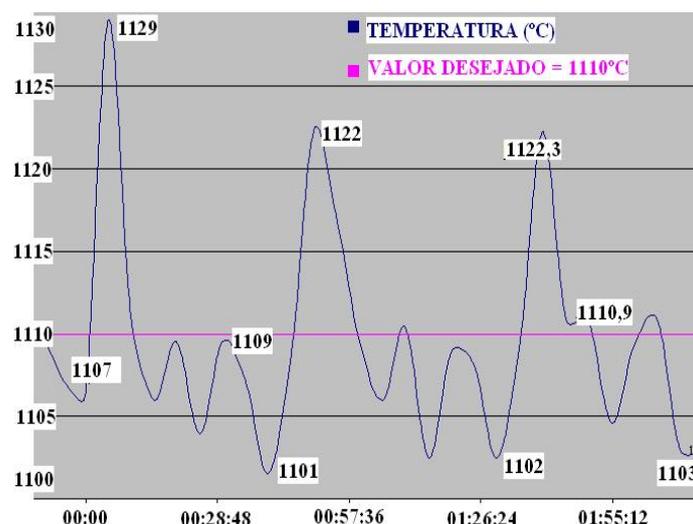


Figura 6. Variação da temperatura do ar quente durante as trocas de regeneradores.

3.1 Controle em Malha Fechada na Troca

A abertura em alta velocidade da MB durante as trocas, realizada por cálculo empírico, não considera variações na temperatura do ar quente, ou seja, o cálculo é realizado em função da posição da válvula CB do regenerador que está saindo de ventilação e da posição da válvula MB. Este fato contribui para a queda acentuada da temperatura durante a troca, caso o Alto Forno esteja com vazão de ar soprado reduzida e o regenerador que permanece em ventilação esteja com reserva térmica mais baixa que os demais. A Figura 7 mostra o comportamento da temperatura quando o regenerador 4 estava com reserva térmica mais baixa e quando ocorreu a troca.

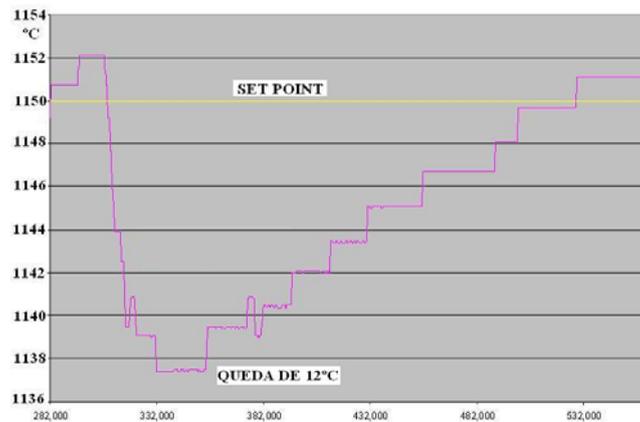


Figura 7. Queda acentuada da temperatura durante a troca.

Visando reduzir variações da temperatura durante as trocas, foi proposta a implementação de uma lógica permitindo abertura controlada da MB, via controlador de temperatura do ar quente, em substituição à abertura rápida (cálculo empírico), possibilitando abertura da MB conforme à variação da temperatura. Foi elaborada uma lógica para alteração automática dos parâmetros de sintonia do controlador durante as trocas, aumentando a velocidade de correção da perturbação.

A sintonia deve proporcionar ao sistema estabilidade e controles regulatório e servo. Esses requisitos devem assegurar variabilidade reduzida da variável controlada. Dessa forma, os métodos de sintonia neste artigo foram baseadas em modelo de 1ª ordem mais atraso - FOPDT (*First Order Plus Dead Time*):

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot e^{-\theta s}$$

Onde K é ganho estático, τ é a constante de tempo e θ é o atraso de transporte. Para o cálculo dos parâmetros do modelo foi utilizado o método de estimação de Smith baseado na resposta do processo ao degrau.⁽⁷⁻⁹⁾

A Figura 8 apresenta os dados para o cálculo dos parâmetros do modelo, considerando-se o controlador em modo manual e sendo aplicados quatro degraus na variável manipulada (posição da válvula MB), dois na abertura e dois no fechamento da válvula:

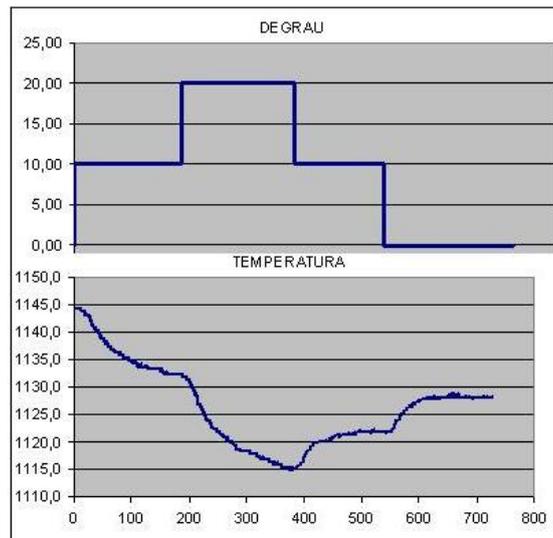


Figura 8. Degraus aplicados no processo.

Foram estimados dois modelos, um para o período de ventilação normal, onde ocorrem pequenas variações e alteração de *set-point*, e outro considerando a troca entre regeneradores, visto que durante a troca ocorre a abertura da válvula MB em função da elevação de temperatura.

Os parâmetros do modelo para o período de ventilação foram calculados em função da média dos parâmetros dos quatro degraus aplicados, obtendo a função de transferência a seguir:

$$G_p(s) = \frac{-1,11}{38,44s + 1} \cdot e^{-24,06s}$$

Ao passo que os parâmetros do modelo para o período de troca de regeneradores foram calculados em função da média dos parâmetros dos degraus aplicados na abertura, obtendo a função de transferência a seguir:

$$G_p(s) = \frac{-1,44}{55,13s + 1} \cdot e^{-18,63s}$$

3.2 Simulação Computacional

O controlador utilizado no sistema de controle é o PID configuração ISA (ideal), que possui a seguinte função de transferência: ⁽⁹⁾

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} + \tau_d \cdot s \right)$$

Para cálculo dos parâmetros do controlador foram considerados três métodos de sintonia: Ziegler Nichols, CHR (regulatório) e Cohen Coon. ⁽⁹⁾

As Figuras 9 e 10 mostram os resultados de simulação de controle da temperatura de ar quente na ventilação e na troca, respectivamente. Os parâmetros de desempenho (*overshoot*, tempo de subida e de resposta) estão indicados nas respectivas figuras.

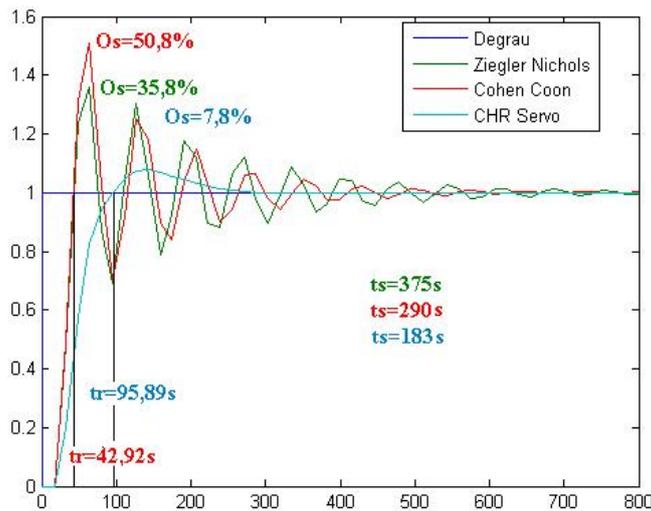


Figura 9. Comportamento em malha fechada durante a ventilação.

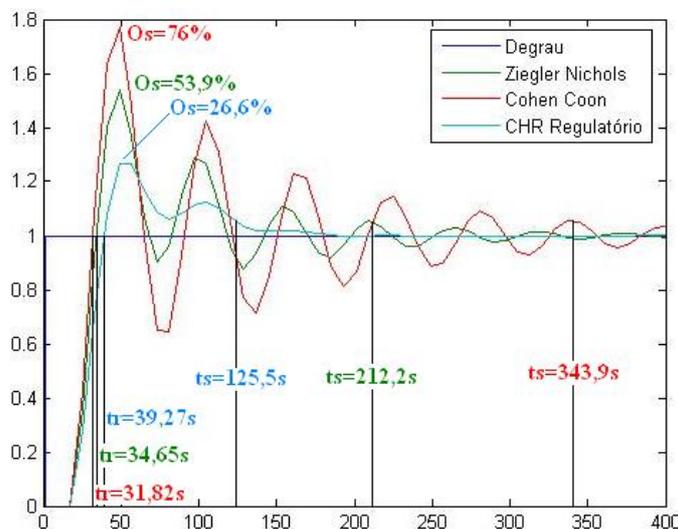


Figura 10. Comportamento em malha fechada durante a troca.

O controlador escolhido para o período de ventilação (sem troca) foi o calculado utilizando o método CHR (situação servo), visto que a resposta apresentou menor sobressinal (7,8%), menor tempo de resposta (183s) e nesta situação ocorre somente alterações de *set-point* sem necessidade de rápida correção:

$$G_{VENTILAÇÃO}(s) = 0,86 \cdot \left(1 + \frac{1}{38,44 \cdot s} + 12,03 \cdot s \right)$$

O controlador escolhido para a troca foi o calculado utilizando o método CHR (situação regulatória), visto que a resposta apresentou menor sobressinal (26,6%), menor tempo de acomodação (125,5s) e que nesta situação ocorrem distúrbios na temperatura que exigem rápida correção:

$$G_{TROCA}(s) = 1,95 \cdot \left(1 + \frac{1}{44,23 \cdot s} + 7,84 \cdot s \right)$$

3.3 Resultados Reais

Neste item é comparado o previsto com o realizado para os resultados quantitativos e qualitativos. O índice utilizado para avaliação de desempenho foi o CP (índice de capacidade de processo), que é conhecido como índice de capacidade potencial do processo. Compara as especificações do processo com as variações apontadas nas amostras de dados coletadas, através do desvio padrão da população, estimado pelo desvio padrão da amostra:⁽¹⁰⁾

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Cp = Capacidade potencial de processo
LSE = Limite superior especificado
LIE = Limite inferior especificado
 σ = Desvio padrão

Tabela 1. Parâmetros CP

VALOR CP	STATUS	O QUE FAZER
Cp < 1,00	Inaceitável, valores de processo fora do especificado.	Verificar máquina, processo, ferramentas, etc e promover modificações que melhorem a qualidade e reavaliar o Cp.
1,00 < Cp < 1,33	Processo Bom	Manter o processo nesta faixa buscando promover melhorias para aumentar qualidade e reduzir custos.
Cp > 1,33	Processo Excelente	Processo de alto nível com margem de segurança suplementar de 3s. É desejável que os processos estejam nesta faixa.

A Figura 11 apresenta os resultados reais com as melhorias realizadas. Nota-se que os picos de temperatura durante as trocas foram reduzidos consideravelmente. O erro estacionário foi reduzido de 5°C para aproximadamente 0°C.

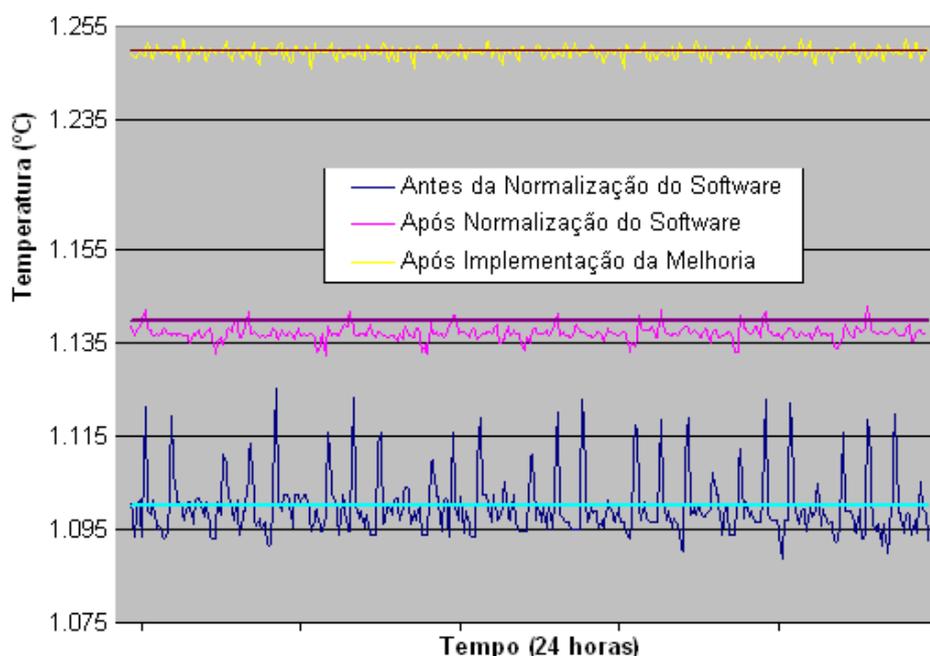


Figura 11. Variação diária da temperatura do ar quente após melhoria.

Através das implantações das melhorias de controle realizadas, atualmente o alto forno 1 apresenta um sistema de controle de temperatura do ar quente com resultados satisfatórios, agregando desta forma maior qualidade ao gusa líquido e maior vida útil dos componentes eletromecânicos das malhas de controle.

3.4 Comparação Quantitativa dos Resultados

A Tabela 2 mostra os valores dos índices CP e desvio padrão (σ) para as diferentes situações. Foram obtidos resultados relevantes que demonstram as melhorias agregadas ao processo com relação ao controle de temperatura de ar quente. Houve uma evolução do desempenho em relação ao melhor resultado obtido de 82,19% antes da verificação geral da malha e da análise da aplicação do software no SDCD da planta, e 21,30% em relação a implementação da melhoria na filosofia de controle e após a sintonia.

Tabela 2. Comparativa de resultados antes e depois da implementação

Índices	Antes da Normalização do Software	Após Normalização do Software	Após Melhoria
Desvio padrão (σ)	6,52	1,47	1,16
CP	0,51	2,26	2,87
Avaliação CP	<i>CP < 1,00 Inaceitável, valores de processo fora do especificado</i>	<i>CP > 1,33 Processo Excelente</i>	<i>CP > 1,33 Processo Excelente</i>
% Evolução/Melhoria	82,19%	21,30%	<i>Referência</i>

4 CONCLUSÕES

As melhorias advindas da re-programação da lógica de fechamento da válvula MB foi possível devido a estudos dos diagramas elétricos, dos diagramas de instrumentação e de seqüências lógicas, bem como o estudo de manuais e pesquisas de campo. Assim foi elaborado um descritivo de funcionamento da malha de controle, que contribuiu consideravelmente na elaboração das modificações implantadas.

As melhorias provenientes da implantação de controle contínuo foram possíveis por meio de técnicas de modelagem do comportamento dinâmico da temperatura do ar quente e métodos de sintonia de controle da literatura⁽⁹⁾. Após a realização da etapa de testes e atestada a confiabilidade do sistema pela operação, houve uma divulgação da melhoria para nivelamento da informação, visando alteração de procedimentos operacionais e de manutenção caso necessário.

Agradecimentos

Os autores agradecem a ArcelorMittal Tubarão por todo o apoio na concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Vitorino, T.A.S. Raciocínio baseado em casos: conceitos e aplicações. Dissertação de mestrado, UFMG, 2009.
- 2 Muske, K.R., Howse, J.W., Hansen, G. A., Cagliostro, D.J. (2000a) Model-based control of a thermal regenerator. Part 1: dynamic model. Computers and Chemical Engineering. Vol. 24, 2519-2531.
- 3 Muske, K.R., Howse, J.W., Hansen, G. A., Cagliostro, D.J. (2000b) Model-based control of a thermal regenerator. Part 2: control and estimation.

- 4 Zhuwu, M.; Shengqiang, L.; Gang L.. (2002) The Intelligence Burning Control of the Hot Stove of Lianyuan Iron & Steel Group Co, Metallurgical Automation, no. 4, pp. 11-15
- 5 Jinsheng S., Peichang, W., Jianhua, W. (2007) Case-Based Expert Controller for Combustion Control of Blast Furnace Stoves. In: IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China.
- 6 Nieckele, A.O., Pires, L.F.G, Ortega, A.J., Mosckem, S.L. (2006) Análise de transients em linhas para alto-forno. In: Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Curitiba, Brasil.
- 7 Coelho, A. A. R.; Coelho, L. S. (2004) Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis: UFSC.
- 8 Aguirre L.A. (2000). Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais, Editora da UFMG.
- 9 Seborg, D.E. (2003) Process Dynamics and Control 2ed.. Editora. IE. WILEY.
- 10 Kume, H. Métodos Estatísticos para melhoria da qualidade. São Paulo: Ed. Gente, 1993.