

## INSTRUMENTAÇÃO, MODELAGEM E CONTROLE DE VAZÃO E TEMPERATURA DE UM PILOTO DE REGENERADOR DE ALTO-FORNO

ROBERTO DALMASO, CELSO J. MUNARO

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFES  
Vitória, ES, Brasil  
E-mail: dalmaso@ucl.br, munaro@ele.ufes.br*

**Abstract**— The control of temperature and flow in regenerators used in blast furnaces is a subject of great interest since its correct operation ensures the quality of the products generated in the blast furnace and minimizes energy costs. A pilot regenerator proposed in the literature has been redesigned with new instruments to correct undesirable behaviors observed in its operation, different from that of the real system it should emulate. New models were obtained, controllers were designed and with the new mass flow sensor installed, temperature control and flow presented good performance, even facing exchange of the regenerators that cause major disturbances.

**Keywords**— Modeling, blast furnace, process control, sensors and instrumentation.

**Resumo**— O controle de temperatura e vazão em regeneradores usados em altos-fornos é um assunto de grande interesse, pois sua correta operação garante a qualidade dos produtos gerados no alto-forno além de minimizar os custos com energia. Um piloto de regenerador proposto na literatura foi reprojetoado e reinstrumentado de forma a corrigir comportamentos indesejáveis observados em sua operação, que diferiam do sistema real que deve emular. Novos modelos foram obtidos, controladores foram projetados, e com o novo sensor de vazão mássica instalado o controle de temperatura e vazão mostrou bom desempenho, mesmo face a trocas de regeneradores que causam grandes distúrbios.

**Palavras-chave**— Modelagem, alto-forno, controle de processos, sensores e instrumentação.

### 1 Introdução

Uma das matérias primas mais importantes utilizadas na produção do aço, presente em carros geladeiras, pontes, estruturas metálicas e em muitos outros itens, é o ferro gusa. O ferro gusa é produzido em um processo de oxirredução conduzido dentro de um equipamento chamado de alto-forno, onde alguns dos parâmetros mais importantes em sua produção são a temperatura e a vazão do ar quente insuflado através das ventaneiras dentro do corpo do forno, responsáveis diretos pela qualidade do subproduto gerado. O processo de redução das matérias primas carregadas no forno a ferro gusa envolve temperaturas extremamente altas (superiores a 1000°C) o que torna a condução de experimentos aplicados diretamente às instalações do processo, como feito em Jinsheng et al. (2008) e Choi et al.(2006), algo muito perigoso e potencialmente custoso, favorecendo assim o uso de um piloto que consiga, dentro de condições adequadas, o estudo de técnicas que possam ser posteriormente utilizadas no processo original.

O equipamento responsável pela geração do ar quente no processo de fabricação de gusa é o regenerador. Uma torre cilíndrica revestida internamente de tijolos refratários com o objetivo de manter o calor gerado através da queima de gases, feita na câmara de mistura, e posteriormente conduzida por entre os refratários de suas paredes. Um alto-forno, dependendo de seu volume e geometria do regenerador, pode apresentar três ou quatro regeneradores, os quais trabalham sempre alternando entre ciclos absorção de calor (aquecimento) e fornecimento de calor, ou seja,

enquanto um regenerador é aquecido os outros fornecem calor para o ar que será insuflado no alto-forno. Em (Amorim et al., 2010) testes de resposta do degrau e análise das fontes de distúrbio foram realizados com o objetivo de reduzir a variabilidade da malha de controle de temperatura. Melhores estratégias de controle podem ser utilizadas com modelos mais complexos, como os discutidos em (Muske et al., 2000a e 2000b), porém com parâmetros mais difíceis de obter.

Para possibilitar o estudo, em especial, do comportamento da vazão e temperatura do ar de saída do conjunto de regeneradores no momento da troca de ciclos, um piloto foi construído em Munaro et al. (2011) e utilizado para vários levantamentos e testes de diferentes técnicas de controle (Munaro et al., 2012). Entretanto, testes feitos posteriormente indicaram comportamentos diferentes do que ocorrem no processo original, levando a necessidade de modificações de seus atuadores e sensores. Neste artigo são descritas e justificadas as modificações, com novas curvas de resposta que comprovam terem sido sanados os problemas observados. O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção seguinte descreve o piloto original, os problemas verificados e as soluções criadas. Na Seção 3 são mostrados os sinais aplicados no piloto aperfeiçoados, os modelos obtidos e os testes em malha fechada. As conclusões são apresentadas na Seção 4.

## 2 Descrição do piloto original e modificações realizadas

O diagrama do piloto original é apresentado na Figura 1. As vazões eram manipuladas através da variação das velocidades ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$ ) de três ventiladores centrífugos e a temperatura do ar da saída, mudando-se a relação entre as vazões de ar frio e quente. A vazão não era medida, mas inferida a partir da queda de pressão tomada a montante da válvula manual instalada em sua saída. A temperatura do ar de saída dos regeneradores era controlada a partir de termostatos.

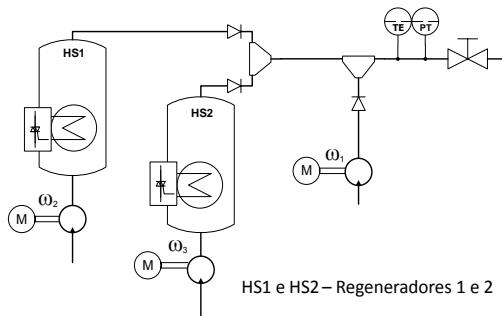


Figura 1. Diagrama do piloto original

Um dos problemas que se observa a partir do diagrama é que as válvulas de bloqueio não poderiam permitir a passagem simultânea do ar exceto quando a pressão nas diversas linhas fosse igual, o que imporia ao controle uma restrição de somente trabalhar com vazões iguais de ar frio e quente. O problema ficou evidente ao se instalar um medidor de vazão mássica na saída do piloto e as velocidades  $\omega_1$  (ar frio) e  $\omega_2$  (ar quente) eram alteradas de forma senoidal, porém com uma defasagem de  $180^\circ$ , como mostrado na Figura 2.

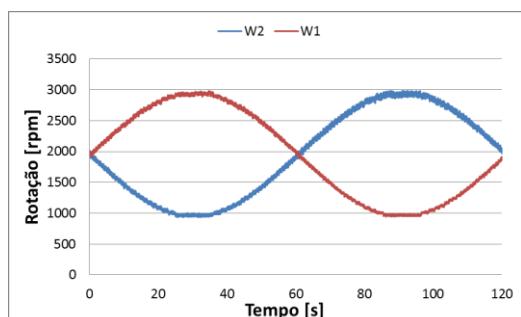


Figura 2. Variações das velocidades

Era desejável que com as variações de velocidades se obtivesse temperaturas variando proporcionalmente à razão das mesmas na saída, porém, o resultado foi bem diferente do desejável. A temperatura de saída se manteve constante durante os primeiros sessenta segundos do teste, enquanto a velocidade do ventilador de ar frio era maior que a velocidade do ar quente (Figura 3), passando a aumentar apenas para  $\omega_2 > \omega_1$ . Ainda assim, o aumento não foi proporcional à relação das velocidades como esperado.

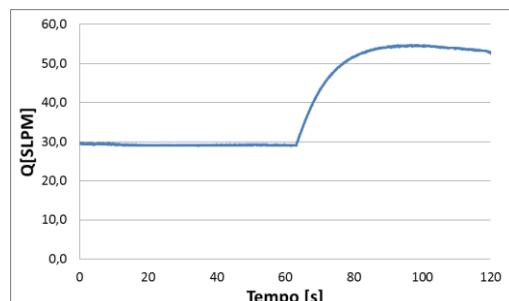


Figura 3. Gráfico da temperatura de saída

A partir desse resultado, as seguintes modificações foram planejadas e implantadas na planta piloto:

1. Instalação de um medidor de vazão mássica por dispersão térmica;
2. Instalação de três válvulas de controle;
3. Uso de apenas um ventilador para as três válvulas;
4. Controle de temperatura dos regeneradores por meio de tiristores;
5. Instalação de sensores de temperatura nas saídas dos regeneradores.

O diagrama da nova planta é apresentado na Figura 4, sua foto na Figura 5 e na Tabela 1 é listada a nomenclatura utilizada.

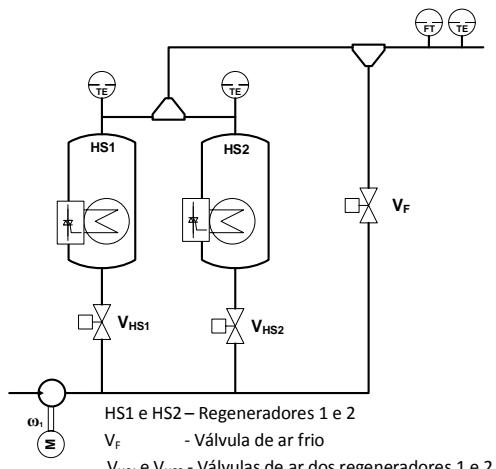


Figura 4. Diagrama do novo piloto

Dadas as restrições de custo das equivalentes comerciais, as válvulas de controle foram construídas com motores de passo, atuadores lineares e válvulas de pressão para tubulações residenciais de água.



Figura 5. Foto do novo piloto

Tabela 1. Nomenclatura utilizada

$V_{HS1}$	Válvula da linha de ar do regenerador 1
$V_{HS2}$	Válvula da linha de ar do regenerador 2
$V_F$	Válvula da linha de ar frio
$HS1$	Regenerador 1
$HS2$	Regenerador 2
$q_{HS1}$	Calor cedido ao regenerador 1 durante o ciclo de aquecimento
$q_{HS2}$	Calor cedido ao regenerador 2 durante o ciclo de aquecimento
$C_Q$	Câmara de mistura do ar quente
$C_F$	Câmara de mistura do ar quente e ar frio
$x_{HS1}$	Posição da válvula de ar do regenerador 1
$x_{HS2}$	Posição da válvula de ar do regenerador 2
$x_{VF}$	Posição da válvula de ar frio
$\dot{m}_{HS1}$	Vazão mássica de ar do regenerador 1
$\dot{m}_{HS2}$	Vazão mássica de ar do regenerador 2
$\dot{m}_F$	Vazão mássica de ar frio
$T_{HS1}$	Temperatura do ar do regenerador 1
$T_{HS2}$	Temperatura do ar do regenerador 2
$T_{HS}$	Temperatura do ar na saída da câmara de mistura dos regeneradores
$T_{AMB}$	Temperatura ambiente
$T$	Temperatura do ar de saída da planta
$\dot{m}$	Vazão mássica do ar de saída da planta

Para o novo piloto, uma placa de interface com a planta foi projetada e montada de forma a realizar todo o condicionamento dos sinais de campo e comando dos atuadores (tiristores para os aquecedores elétricos e drivers para os motores). A placa utiliza um microcontrolador de 32 bits com comunicação USB, o PIC32MX250F128D da Microchip. A placa implementa também alguns filtros analógicos do tipo passa-baixa e vários filtros digitais para os sinais de vazão e temperatura medidos. As temperaturas são medidas utilizando-se sensores de platina do tipo PT1000 e a vazão mássica, um sensor da Honeywell (AWM720P1) baseado em dispersão térmica. A comunicação com um computador pessoal é feita de forma cíclica a cada dez milissegundos. A vista em 3D da placa é apresentada na Figura 6.

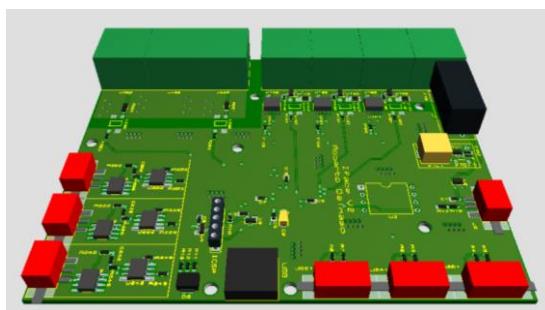


Figura 6. Nova placa de controle

Após as modificações terem sido aplicadas ao piloto, o teste apresentado na Figura 2 foi repetido manipulando-se as novas variáveis  $x_{VF}(t)$  e  $x_{HS1}(t)$ , conforme apresentado nas figuras 7 e 8. Percebe-se pelo

resultado do teste que a temperatura de saída passou a representar uma função entre a relação das posições das válvulas de ar frio e quente. Para maior brevidade, eliminaremos o argumento (t) nas variáveis no domínio do tempo.

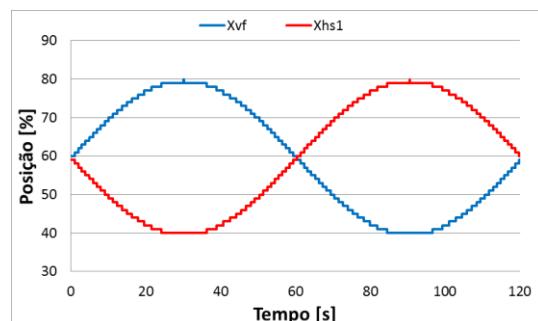
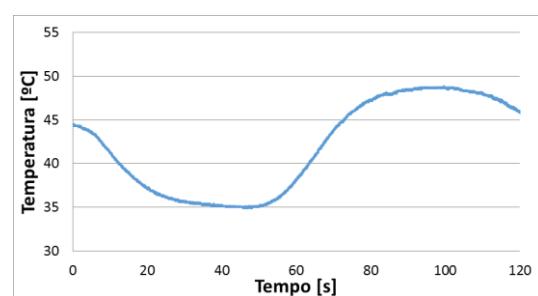
Figura 7. Variação de  $x_{VF}$  e  $x_{HS1}$ 

Figura 8. Temperatura após modificações

### 3 Modelagem da planta piloto

Com o novo piloto definido e em funcionamento foi possível iniciar o levantamento do modelo da planta considerando-se para isto o diagrama apresentado na Figura 9.

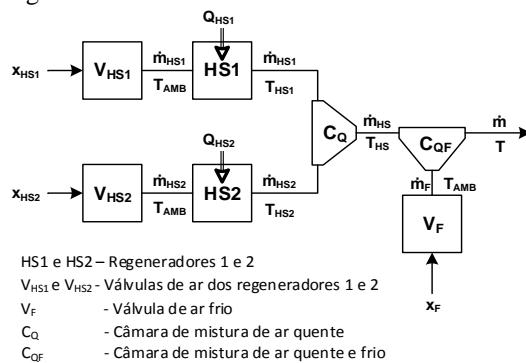


Figura 9. Variáveis e equipamentos da planta piloto

O primeiro teste objetivou conhecer o ponto de operação adequado da planta e definir o tempo correto para o ciclo de aquecimento e troca dos regeneradores. A Figura 10 apresenta o gráfico da temperatura do ar na saída do regenerador 1 (vermelho -  $T_{HS1}$ ), temperatura de saída da planta (laranja -  $T$ ) e a vazão mássica de saída (azul -  $\dot{m}$ ), para uma velocidade do ventilador ( $\omega_1$ ) nominal e constante, uma posição fixada em 50% nas válvulas  $V_F$  e  $V_{HS1}$  e um tempo de aquecimento de 120 segundos a 15% da potência máxima da resistência. O valor de 15% da potência máxima remete a um ângulo de disparo  $\alpha$ , a

ser retirado de uma tabela calculada previamente através de um método numérico aplicado a função inversa da potência, o que será utilizado para controlar o momento do disparo do tiristor. Baseado no resultado desse teste foram definidas a temperatura de trabalho de 50°C e uma vazão mássica de saída igual a 40 SLPM.

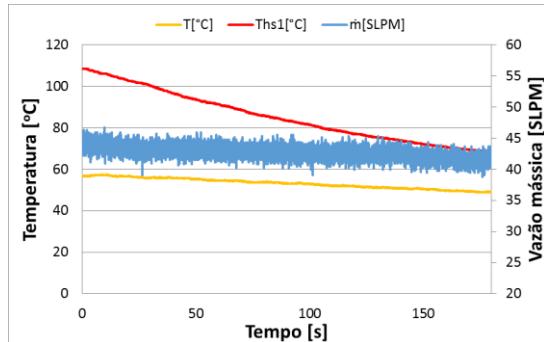


Figura 10. Gráfico da temperatura do regenerador com vazão fixa

Com os valores de trabalho definidos, vários degraus foram aplicados às posições das válvulas para se obter a dinâmica no ponto de operação que relaciona  $\dot{m}$  e  $T$  com  $x_{HS1}$ ,  $x_{HS2}$  e  $x_{VF}$ . O gráfico dos experimentos relacionando  $T$ ,  $\dot{m}$  e  $x_{VF}$  e  $T$ ,  $\dot{m}$  e  $x_{HS1}$  são apresentados nas figuras 11 e 12, respectivamente, onde  $x_{VF}$  (%) é a curva azul,  $\dot{m}$  (SLPM) a verde e  $T$  (°C) a laranja.

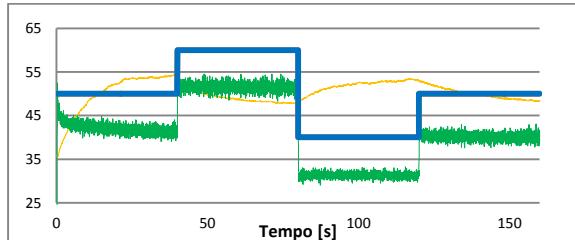


Figura 11. Resposta aos degraus aplicados em  $x_{VF}$

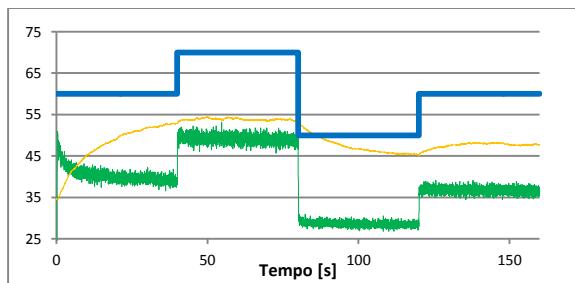


Figura 12. Resposta aos degraus aplicados em  $x_{HS1}$

A partir dos dados, quatro modelos representando a dinâmica do sistema no ponto de operação, baseados em processos de primeira ordem foram encontrados:

$$G_1(s) = \frac{T(s)}{X_{VF}(s)} = -0,42046 \frac{(1,7937s + 1)}{(15,888s + 1)}$$

$$G_2(s) = \frac{sM(s)}{X_{VF}(s)} = \frac{0,86836}{(0,056429s + 1)}$$

$$G_3(s) = \frac{sM(s)}{X_{HS1}(s)} = \frac{0,8703}{0,06388s + 1}$$

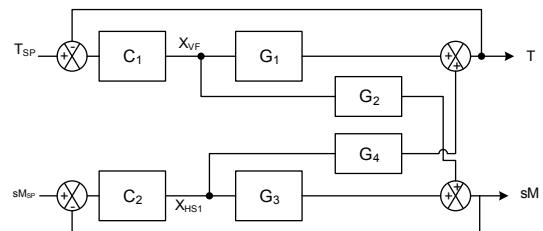
$$G_4(s) = \frac{T(s)}{X_{HS1}(s)} = 0,32845 \frac{0,2104s + 1}{7,4549s + 1}$$

Encontrados os modelos, os compensadores digitais foram projetados e o sistema foi colocado em malha fechada (Figura 13), sendo uma malha de vazão, a partir da medição de  $\dot{m}$  e manipulação de  $x_{HS1}$  e / ou  $x_{HS2}$ , e outra de temperatura, a partir da medição de  $T$  e manipulação de  $x_{VF}$ . Os compensadores encontrados foram:

$$C_1(s) = -0,50974 \frac{(1 + 3,4s)}{s}$$

$$C_2(s) = 28,862 \frac{(1 + 0,019s)}{s}$$

A estratégia de controle mostrada na Figura 13 é a mesma utilizada no processo real. Um aumento em  $x_{VF}$  causa um aumento na vazão e uma redução na temperatura (ganho negativo em  $G_1(s)$ ). Por outro lado, um aumento de  $x_{HS1}$  causa um aumento nas duas variáveis de saída. O controlador  $C_1(s)$  tem um ganho negativo, de modo que quando a temperatura diminui, também diminui o valor do sinal aplicado na válvula. Isto faz com que a vazão e a temperatura diminuam, implicando na ação do controlador  $C_2(s)$  para compensar a redução da vazão, que ao aumentar  $x_{HS1}$ , aumenta as duas variáveis. Este modo cooperativo das ações de controle garante a estabilidade do sistema em malha fechada.



$X_{VF}$  – Posição da válvula de ar frio  
 $X_{HS1}$  – Posição da válvula de ar do regenerador 1

Figura 13. Planta piloto em malha fechada

As funções de transferência em malha fechada que relacionam  $T(s)$  e  $sM(s)$  com  $T_{sp}(s)$  e  $sM_{sp}(s)$  de ordem 8 foram obtidas, e na figura abaixo são mostrados seus polos, sendo que dois são complexos com parte real menor que -0,5 e não são mostrados para melhor visualização dos polos próximos à origem, porém no semiplano esquerdo demonstrando a estabilidade. A ordenada representa a parte real dos polos e a abscissa, a parte imaginária.

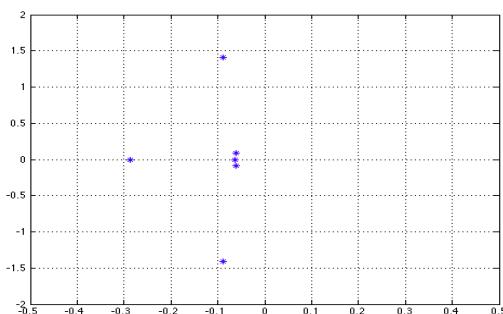


Figura 14. Polos de malha fechada

Para testar o funcionamento da planta com os compensadores projetados, os regeneradores foram colocados em operação contínua e configurados para funcionar da seguinte forma:

1. HS1 aquecendo por 120 segundos;
2. HS1 soprando e HS2 aquecendo por 120 segundos;
3. HS1 e HS2 soprando juntos por 10 segundos;
4. HS2 soprando e HS1 aquecendo por 120 segundos;
5. HS1 e HS2 soprando juntos por 10 segundos;
6. Repete a partir de 2;

A Figura 15 mostra dois ciclos e duas trocas completas onde se percebe que a temperatura do fluido de saída  $T$  (curva vermelha) fica próxima do valor esperado de 50°C, assim como a vazão mássica  $\dot{m}$  varia sobre o valor de referência 40 SLPM (curva azul). Porém, percebe-se que o controle tem dificuldades de manter os valores de referência durante as trocas por falta de uma estratégia mais adequada para tal momento, o que acontece nos intervalos entre 120 e 130 segundos e 240 e 250 segundos.

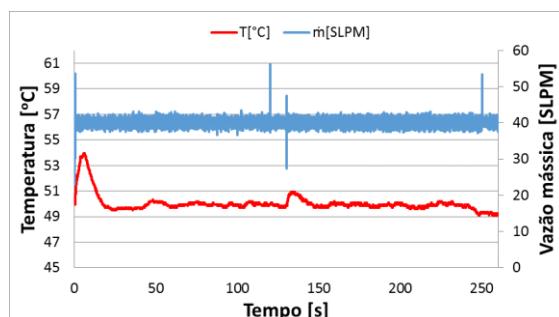


Figura 15. Resposta da planta em operação contínua

Comparando-se esta resposta com aquela obtida em Munaro et al. (2012) e considerando a aplicação de estratégias de controle idênticas à da planta real, fica claro que este novo piloto apresenta um comportamento muito superior. O tempo de estabelecimento para resposta ao degrau foi reduzido de 40s para 15s, e a perturbação da temperatura na troca de regeneradores foi reduzida de 8% para 3%. Pode assim ser utilizado para o projeto de controladores mais sofisticados com o objetivo de melhorar o desempenho nas trocas de regeneradores bem como reduzir o consu-

mo de energia mantendo a vazão de ar quente na temperatura desejada.

#### 4 Conclusões

O problema de controle e temperatura de vazão de ar quente produzido por regeneradores de alto-forno foi aqui considerado. Um piloto de regenerador desenvolvido para teste de estratégias de controle foi reprojeto e recebeu nova instrumentação, de modo a emular melhor o comportamento da planta real, o que foi confirmado pelas respostas obtidas aos sinais de teste. Os modelos de vazão e temperatura com os respectivos acoplamentos foram modelados a partir de respostas ao degrau. Usando a mesma estratégia de controle da planta real, dois controladores foram projetados e asseguraram o seguimento de referências de temperatura e vazão, com sua estabilidade comprovada pela análise da função de transferência de malha fechada. Durante a troca de regeneradores os erros tornaram-se maiores, devido ao acoplamento existente entre as malhas, devendo o mesmo ser analisado através de técnicas adequadas. As estratégias para troca de regeneradores devem ser avaliadas e o uso controle multivariável e ótimo considerado para reduzir o consumo de energia e ainda assim atender as especificações do ar fornecido ao alto-forno.

#### Referências Bibliográficas

- Jinsheng, S and Haigang, F. (2008). Implementation of CBR strategy for combustion control of blast furnace stoves, pp.1261-1268, Chinese Control and Decision Conference, Shandong-China.
- Choi, W; Yoo, W and Won, S (2006). Development of automatic temperature control system in blast furnace, SICE-ICASE Int. Joint Conference, pp.899-903, Busa-Korea.
- Amorim, T.F., Lima, J.A., Mattedi A. (2010). Um estudo de caso de malhas de controle de temperatura do ar quente do alto forno 1 da Arcelor-Mittal Tubarão, IX INDUSCON, São Paulo, 2010
- Muske, K.R., Howse, J.W., Hansen, G. A., Cagliostro, D.J. (2000a) Model-based control of thermal regenerator. Part 1: dynamic model. Computers and Chem. Engineering.V. 24, 2519-2531  
DOI: [10.1016/S0098-1354\(00\)00613-X](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00613-X)  
DOI: [10.1016/S0098-1354\(00\)00614-1](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00614-1)
- 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.
- Munaro, C. J e Paes, A.A. (2011). Construção, modelagem e controle de um piloto de regenerador de alto-forno, DINCON 2011, SP.
- Munaro, C. J; Souza, T. A; Paes, A. A. e Mattedi, A. (2012). Implementação de Controle de Temperatura e Pressão para um Piloto de Regeneradores de Alto-Forno, INDUSCON 2012, Fortaleza - CE.