



RESSINTONIA DAS MALHAS DE CONTROLE DE VAZÃO DE COG E AR DO FORNO DE TRATAMENTO TÉRMICO N° 2 DA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS DA USIMINAS DE IPATINGA¹

Claret Laurente Sabioni²

Fábio Gonçalves Jota³

Gilson Domingos⁴

Milton César de Oliveira⁵

Roosevelt Silva⁶

Carlos Augusto Souza de Oliveira⁷

Resumo

Uma metodologia é proposta para a ressintonia dos controladores de vazão de COG e de ar do Forno de Tratamento Térmico N° 2 da Laminação de Chapas Grossas da Usiminas em Ipatinga, com o objetivo de utilizar seus recursos de forma mais eficiente. Baseando-se nos modelos de 1ª ordem, determinados para as 26 malhas de vazão, foram propostos planos de manutenção de válvulas e de ressintonia dos controladores de ação proporcional e integral (PI). Após a validação do método, verificou-se, a curto prazo, uma redução média de 8,5% no consumo de gases e de 52,6% no percurso das válvulas e, a longo prazo, uma redução média de 9,9% no consumo de gases e de 72,36% no percurso das válvulas. Resultados foram obtidos no âmbito econômico, de manutenção e de qualidade.

Palavras-chave: Malhas de controle de vazão; Ressintonia de controladores; Forno de tratamento térmico; Eficiência energética.

TUNING OF THE COG AND AIR FLOW CONTROL LOOPS OF THE HEAVY PLATE HEAT TREATMENT FURNACE NO. 2 OF THE USIMINAS STEEL PLANT AT IPATINGA

Abstract

A methodology is proposed for tuning the COG and air flow control of the Heavy Plate Heat Treatment Furnace No. 2 in Usiminas Steel Plant at Ipatinga, aiming at the efficient usage of the resources involved in this process. Based on the first-order models, determined for all the 26 flow loops, maintenance plans and retuning actions were proposed for the control valves and associated PI controllers. After validation, it has been observed, in the short-term, an average reduction of 8.5% on the gas consumption and of 52.6% on the valves travel. In the long-term, the average reduction has been of 9.9% on the gas consumption and of 72.36% on the valves travel. Results were obtained on economical, maintenance, and quality aspects.

Key words: Flow control loops; Controllers retuning; Heat treatment furnace, Energy efficiency.

¹ Contribuição técnica ao 33º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 27º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 22 a 24 de agosto de 2012, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro de Controle e automação. Doutorando do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG.

³ Engenheiro Eletrônico e de Telecomunicações. Professor Doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG.

⁴ Engenheiro Eletricista. Eng. da Gerência de Instrumentação da Usiminas de Ipatinga.

⁵ Técnico em eletrônica. Supervisor do Forno de Tratamento Térmico N° 2 da Usiminas de Ipatinga.

⁶ Técnico em metalúrgica. Técnico da Gerência de Instrumentação da Usiminas de Ipatinga.

⁷ Técnico em eletrônica. Supervisor da Gerência de Instrumentação da Usiminas de Ipatinga.



1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as empresas brasileiras, em particular, as siderúrgicas, têm enfrentado uma crescente concorrência estrangeira. Com o propósito de se manterem fortes no mercado, elas buscam no aumento da competitividade o grande diferencial. Para tal, faz-se necessário aumentar a produtividade e a eficiência de seus ativos, seja por meio da melhoria de seus processos, seja por meio da melhoria de seus sistemas de controle automáticos. Com relação à melhoria dos sistemas de controle automáticos, vários trabalhos nos últimos anos foram feitos na Usiminas com este propósito em diferentes plantas: Forno de Reaquecimento de Placas,^(1,2) Lingotamento Contínuo,⁽³⁾ Regeneração de Ácido Clorídrico,⁽⁴⁾ entre outras.

Este trabalho propõe uma metodologia para análise e melhoria do sistema de controle de vazão do Forno de Tratamento Térmico N° 2 (FTT2) da Laminação de Chapas Grossas da USIMINAS em Ipatinga, com o objetivo de utilizar seus recursos de forma mais eficiente.

1.1 Descrição do Processo

O FTT2 é um forno de tubos radiantes, com atmosfera protegida, com extensão de 63 metros dividido em 13 zonas, que se agrupam em 3 grandes zonas: pré-aquecimento (zona 1 à zona 5), aquecimento (zona 6 à zona 9) e encharque (zona 10 à zona 13). Três tipos de tratamentos térmicos podem ser feitos no FTT2: normalização, revenimento e têmpera. A capacidade nominal anual do forno é de 132000 ton/ano.⁽⁵⁾

A combustão no FTT2 é realizada exclusivamente pela queima de gás de coqueria (COG) com o ar atmosférico. Para cada uma das 13 zonas, uma válvula pneumática é usada para controle de vazão de COG e outra para controle de vazão de ar, compondo 26 malhas de controle de vazão.⁽⁵⁾

Pelo fato de o COG ser considerado um dos gases mais “nobres” gerados na cadeia produtiva do aço, sua utilização deve ser feita de forma racional e responsável.

1.2 Descrição do Sistema de Controle

Os processos siderúrgicos, em sua grande maioria, são regidos por sistemas automáticos de controle, que impactam diretamente na eficácia e eficiência do processo. O projeto e a sintonia destes sistemas constituem-se, então, em uma tarefa de suma importância e, por isso, devem ser feitos de forma adequada ao processo. No caso específico do FTT2, o projeto e a sintonia dos sistemas de controle impactam diretamente na regulação da vazão do COG e do ar, sendo, portanto, responsáveis pelo uso racional destes recursos.

O controle do processo no FTT2 é regido por um *Digital Control System (DCS)*.⁽⁶⁾ A estratégia de controle de temperatura utilizada neste sistema de controle digital é o Duplo Limite Cruzado, em que procura-se manter uma razão fixa entre a vazão de ar e de gás COG.^(6,7)

Um diagrama esquemático da lógica de controle é apresentado na Figura 1.

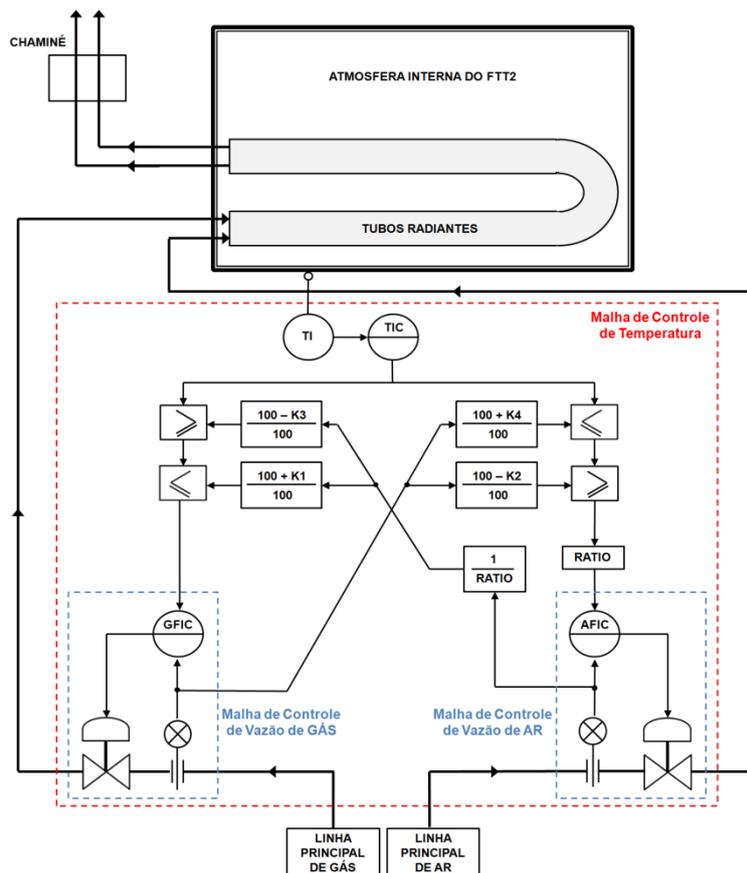


Figura 1. Estratégia de controle de temperatura do FTT2 por meio do Duplo Limite Cruzado.

2 METODOLOGIA

Muitos trabalhos publicados na literatura científica abordam técnicas de controle preditivo, não-lineares e multivariáveis para tratar o problema de controle de fornos de aquecimento e de tratamento térmico, que são processos com dinâmica lenta, com forte acoplamento entre zonas e com grandes atrasos puros de tempo.^(8,9) Entretanto, técnicas de controle clássico utilizando os tão conhecidos controladores PID também podem ser usadas para controlar estes fornos. O trabalho de Wang, Shao e Chai⁽¹⁰⁾ por exemplo, fez uso de técnicas clássicas de controle por zona do forno, obtendo uma redução de 3% no consumo dos gases.

No presente trabalho, primeiramente, foi feito um estudo do forno e de seu sistema de controle, para conhecimento da planta, suas peculiaridades e limitações.

Para a realização dos ensaios em malha aberta, por meio da aplicação de entradas em degraus nos *set-points* (*SP*) de vazão de COG e de vazão de ar de cada malha, foi necessário desativar-se o controle automático de determinadas zonas do forno. Em seguida, excursionou-se cada válvula por todos os seus pontos de operação. Para cada uma das 26 malhas de vazão, variou-se a abertura das válvulas (*MV*) partindo-se de 0% até 100% com passo de +10%. Para cada degrau de 10% aplicado aguardou-se o sistema entrar em regime permanente. Em seguida, foi feito o procedimento inverso, partindo-se de 100% da *MV* até chegar em 0%.

Os estados das válvulas foram analisados com base nos ensaios em malha aberta. Assim, foi possível identificarem-se casos de agarramento de válvula, histerese, vazamento, problema em sensor (placa de orifício), etc. Planos de manutenção de válvulas foram então elaborados com vistas à solução dos problemas detectados.



Após a execução dos planos de manutenção e correção dos problemas das válvulas, estas foram novamente testadas em um procedimento recursivo até que todas as 26 válvulas estivessem em um estado considerado satisfatório.

Para exemplificar este procedimento, a Figura 2 e a Figura 3 apresentam o comportamento dinâmico das válvulas das malhas AFIC207 e GFIC203 em ensaios segundo o procedimento descrito, respectivamente, antes e após a manutenção.

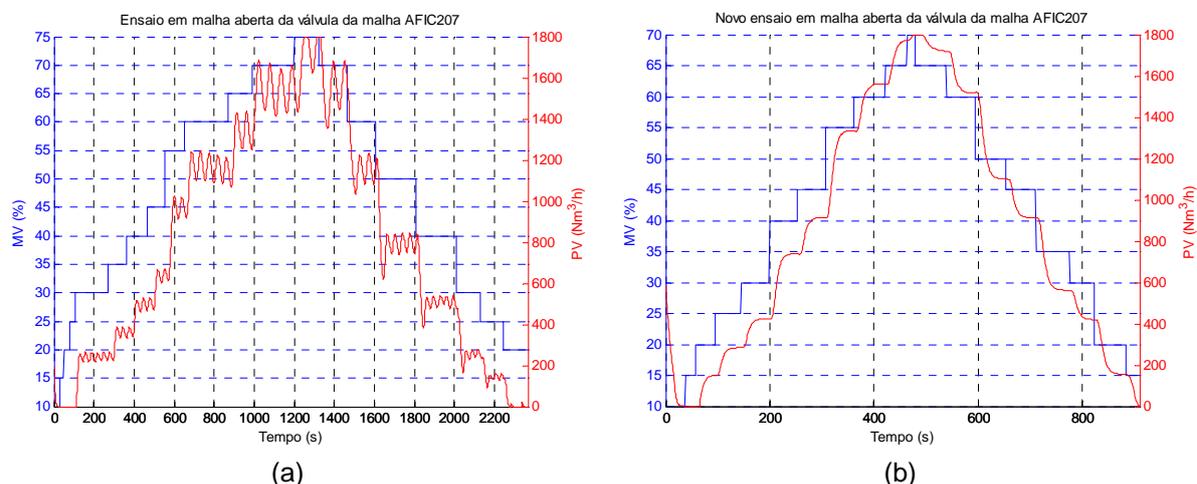


Figura 2. Ensaio em malha aberta da válvula da malha AFIC 207 antes (a) e após (b) o procedimento de manutenção: substituição do conversor da válvula.

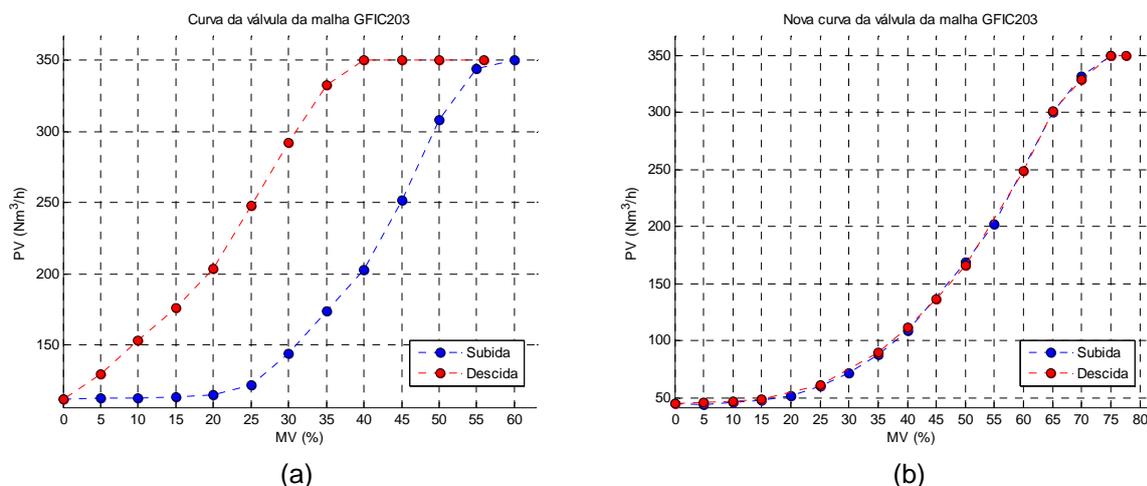


Figura 3. Curva ($MV \times PV$) da válvula da malha AFIC 207 antes (a) e após (b) o procedimento de manutenção: substituição do conversor, do posicionador e do "O-ring" do atuador da válvula.

2.1 Ferramentas e Fluxo de Atividades

A exportação dos dados adquiridos durante os ensaios em malha aberta no DCS foi feita no formato .CSV para o Microsoft ExcelTM. Uma etapa de pré-processamento destes dados foi requerida, deixando-os no formato adequado para importação para o ambiente MATLABTM. Neste ambiente os dados foram analisados por meio de uma rotina computacional, responsável pela determinação dos modelos de 1ª ordem e pelo cálculo dos parâmetros dos controladores PI. Os novos parâmetros dos controladores foram inseridos manualmente no DCS para serem validados. Caso a validação não ocorresse, o procedimento descrito era repetido, como mostra a Figura 4.

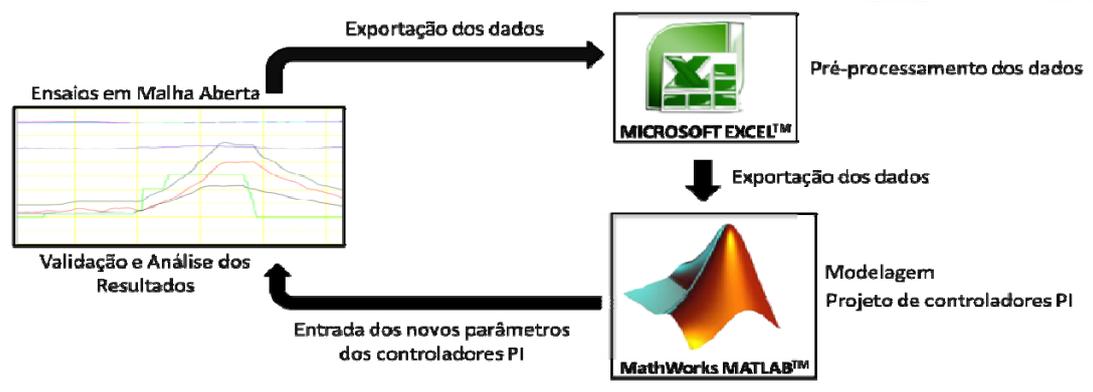


Figura 4. Softwares e fluxo de atividades da metodologia de ressintonia dos controladores do FTT2.

2.2 Modelagem

Para modelar matematicamente plantas industriais, há a necessidade de se “excitar” as variáveis de processo (PV) por meio de variações conhecidas nas variáveis manipuladas (MV), a fim de que o sistema revele sua dinâmica nos transitórios. Para tal, o sistema deve estar em malha aberta. A modelagem foi feita com base nas entradas em degraus aplicadas nas malhas de vazão e suas respectivas saídas.

2.2.1 Método

Conjuntos de modelos de primeira ordem no domínio “s”, Equação 1, foram aproximados para as malhas de vazão de combustível e de ar.

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \tag{1}$$

K - ganho estático; *τ* - constante de tempo; *θ* - tempo morto.

Cada entrada em degrau deu origem a um modelo. Para exemplificar, a Figura 5 mostra na linha azul a aplicação de 11 degraus de entrada em % de abertura da válvula da malha AFIC209, cuja saída em Nm³/h é expressa pela linha vermelha.

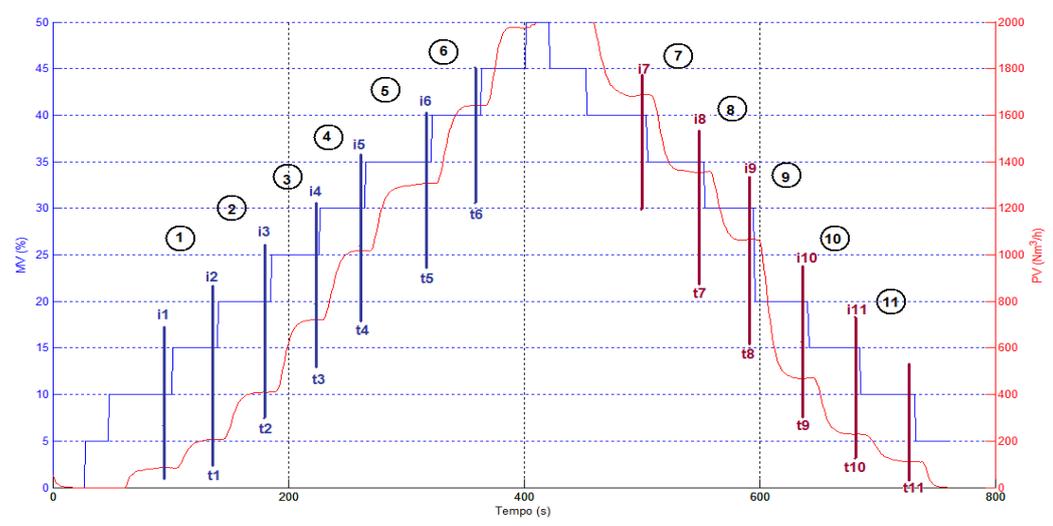


Figura 5. Ensaio em malha aberta da malha AFIC209 com a divisão dos intervalos de análise para determinação dos modelos de 1ª ordem.



No caso da malha AFIC209, Figura 5, cada um dos 11 intervalos gerados pelo par entrada-saída deu origem a um modelo de primeira ordem, totalizando 11 modelos que são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Modelos matemáticos de 1ª ordem para os 11 intervalos definidos no ensaio em malha aberta da malha AFIC209 na Figura 5.

Intervalo	①	②	③	④	⑤	⑥
Modelo	$\frac{24,32}{6,72s+1}e^{-3s}$	$\frac{40,80}{6,54s+1}e^{-3s}$	$\frac{62,04}{6,14s+1}e^{-3s}$	$\frac{59,33}{5,97s+1}e^{-3s}$	$\frac{58,00}{10,12s+1}e^{-3s}$	$\frac{67,16}{6,11s+1}e^{-4s}$
Intervalo	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	
Modelo	$\frac{66,64}{7,03s+1}e^{-3s}$	$\frac{57,87}{5,66s+1}e^{-4s}$	$\frac{59,59}{6,30s+1}e^{-4s}$	$\frac{47,88}{6,00s+1}e^{-4s}$	$\frac{24,29}{8,77s+1}e^{-3s}$	

A obtenção dos parâmetros K e θ de cada modelo foi feita de forma gráfica auxiliada pela rotina computacional desenvolvida. A Figura 6 mostra a obtenção do ganho estático $K = \frac{PV(\infty) - PV(0)}{MV(\infty) - MV(0)} = \frac{1021,7 - 725,0}{5,0} \approx 59,33 [(Nm^3/h)/\%]$ e do tempo morto $\theta = 3$ segundos para o intervalo 4 do Quadro 1, respectivamente.

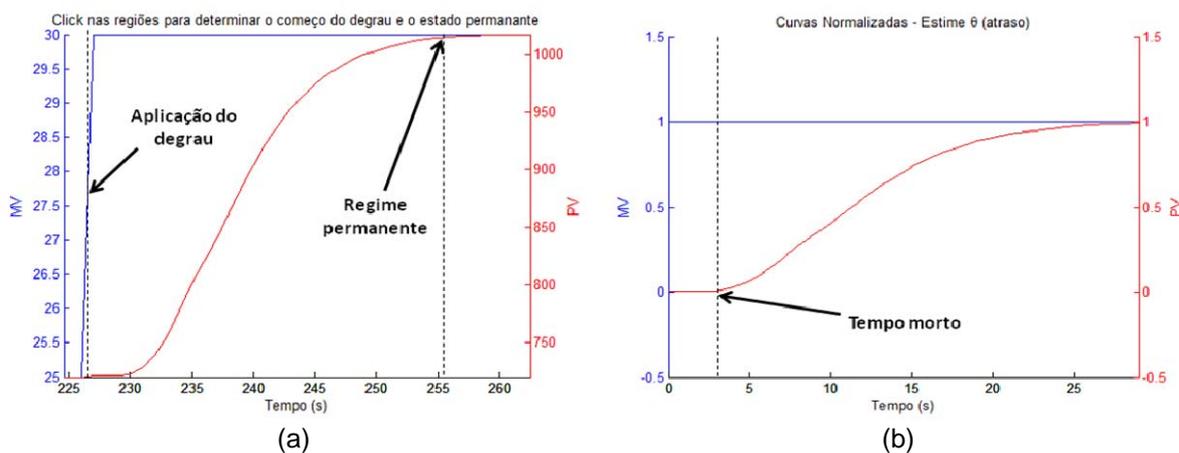


Figura 6. Determinação, por inspeção visual, do regime permanente (a) e do tempo morto (b) do 4º intervalo da malha AFIC209 na Figura 5.

A obtenção do parâmetro τ de cada modelo foi feita de forma automática pela rotina computacional, baseando-se na regressão linear da curva da resposta complementar da malha. No caso do intervalo 4 do Quadro 1 $\tau = 5,97$ segundos, uma vez que ele é o oposto do inverso do coeficiente angular da regressão linear que aproxima o logaritmo natural da resposta complementar.

Este método de obtenção do τ é uma variação do tradicional Método de Resposta Complementar.⁽¹¹⁾ Uma análise mais aprofundada do método pode ser vista no trabalho de Sabioni, Domingos e Jota.⁽¹²⁾

2.2.2 Validação

Todos os modelos gerados para cada válvula foram simulados por meio da aplicação da mesma entrada em degrau com a qual o sistema real foi perturbado. Dessa forma, a resposta do sistema real pôde ser comparada com a resposta da simulação dos modelos. A Figura 7 mostra a validação dos modelos da AFIC209.

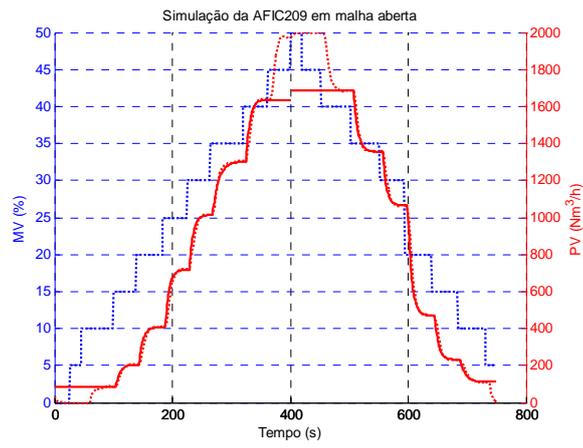


Figura 7. Validação dos modelos de 1ª ordem obtidos para a malha AFIC209. Saída do sistema real (linha vermelha pontilhada), saída simulada dos modelos (linha vermelha contínua) e entrada (linha azul pontilhada).

Uma vez obtidos os modelos, passou-se para etapa de projeto dos controladores.

2.3 Projeto dos controladores

A ressonância dos controladores PI consiste no cálculo de novos valores para os parâmetros de ação proporcional (banda proporcional, **BP**) e ação integral (tempo integral, τ_I), na forma:

$$PI(s) = \frac{100}{BP} \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \tag{2}$$

2.3.1 Método

Com base nos conjuntos de modelos de 1ª ordem obtidos para as 26 malhas, projetou-se um controlador PI, Equação 2, para cada modelo utilizando-se o Método da Síntese Direta,⁽¹³⁾ de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Relação dos parâmetros do controlador PI com os parâmetros do modelo, de acordo com o Método da Síntese Direta⁽¹³⁾

Modelo	BP	τ_I
$\frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	$\frac{100K(\tau + \theta)}{\tau_e}$	τ

Neste processo, a constante de tempo (τ_e) – tempo de resposta – em malha fechada (modo automático) desejada foi igual à constante de tempo em malha aberta, ou seja, $\tau_e = \tau$. Para o intervalo 4 da malha AFIC209, o controlador projetado foi:

$$PI_{AFIC209}(s) = 0,011 \left(1 + \frac{1}{5,97s} \right) \tag{3}$$

Cada malha de vazão contou com diferentes controladores PI calculados para cada um de seus modelos. Para determinar o controlador com melhor desempenho para cada malha, foi empregada a rotina computacional descrita acima que, para cada um dos controladores PI projetados, respostas em malha fechada foram simuladas com diferentes modelos da respectiva malha. Por meio da análise dos índices de desempenho: tempo de acomodação (*settling time*) e percentual de sobre-elevação (*overshoot*), aquele controlador PI cuja resposta foi a mais satisfatória para os



diferentes pontos de operação da válvula foi escolhido como sendo o melhor. A tomada de decisão baseou-se no objetivo de minimizar os índices de desempenho. As Tabelas 2 e 3 apresentam todos os parâmetros calculados para a ressonância dos controladores PI das malhas de vazão de COG e ar, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros calculados dos controladores PI das malhas de vazão de COG

	Malha de Vazão de COG (GFIC)												
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213
BP	537	577	507	539	847	593	272	398	326	487	308	332	388
T_I	4,1	3,5	7,5	6,7	4,8	5,7	9,1	9,6	5,7	6,9	6,7	3,0	7,5

Tabela 3. Parâmetros calculados dos controladores PI das malhas de vazão de ar

	Malha de Vazão de Ar (AFIC)												
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213
BP	460	250	455	563	476	635	423	299	545	459	489	478	559
T_I	8,7	12,3	7,0	5,0	7,8	2,3	7,4	5,0	5,7	6,5	5,5	7,3	5,3

2.3.2 Validação

A próxima etapa consistiu na inserção dos parâmetros calculados dos controladores PI no DCS, seguindo sua formatação específica. Após a inserção dos parâmetros em cada malha, foram aplicadas entradas em degrau nas 26 malhas fechadas para validar os resultados obtidos pela simulação.

A Figura 8 ilustra a validação da ação de controle na malha GFIC205.

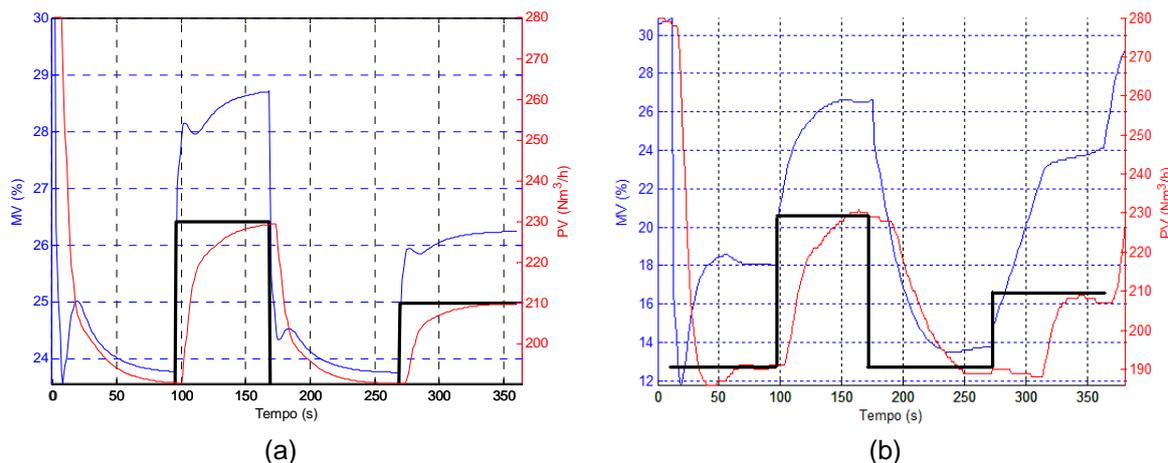


Figura 8. Validação do controlador em malha fechada por meio da comparação entre o resultado da simulação (a) e o resultado experimental (b). Variável de processo – PV (linha vermelha contínua), variável manipulada – MV (linha azul contínua) e set-point – SP (linha preta contínua).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a ressonância das malhas de vazão do FTT2, várias melhorias foram observadas, das quais se destacam: i) a redução do consumo de combustível, ii) o prolongamento da vida útil das válvulas e iii) a diminuição da variabilidade do processo com a consequente melhoria da qualidade das chapas grossas tratadas. As melhorias foram constatadas quantitativamente por meio de dois cenários de comparação: um a curto prazo e o outro a longo prazo.



3.1 Análise a Curto Prazo

A comparação a curto prazo baseou-se na análise ao longo de um dia somente, em que a mudança de comportamento da malha decorrente da resintonia momentos antes e momentos depois de sua efetivação ficou evidente. Assumiu-se, neste caso, que as condições de carregamento do forno foram aproximadamente constantes ao longo do dia. A Figura 9 mostra o acionamento das válvulas (MV) da AFIC204 e da GFIC213 após a resintonia.

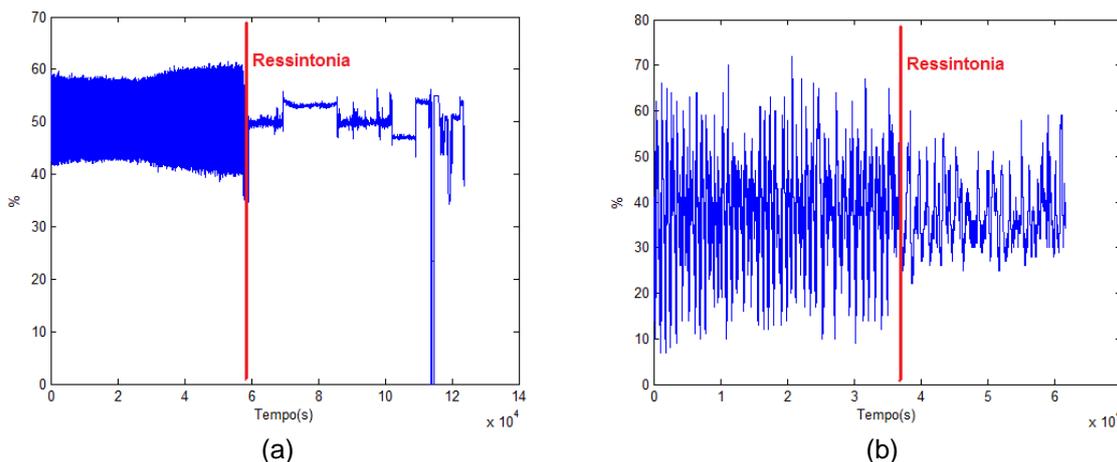


Figura 9. Momentos antes e depois da resintonia das malhas AFIC204 (a) e GFIC213 (b) na escala temporal de 1 dia (análise a curto prazo).

Da Figura 9 percebe-se uma redução significativa no percurso das válvulas, cujo impacto mais provável e evidente será a maior vida útil das mesmas e redução na frequência de manutenção.

Com base no resultado global obtido em todas as 13 zonas do FTT2, obteve-se uma redução de 23,07% no percurso das válvulas de COG e uma redução de 82,13% no percurso das válvulas de ar, como mostra as Figuras 10 e 11, respectivamente.

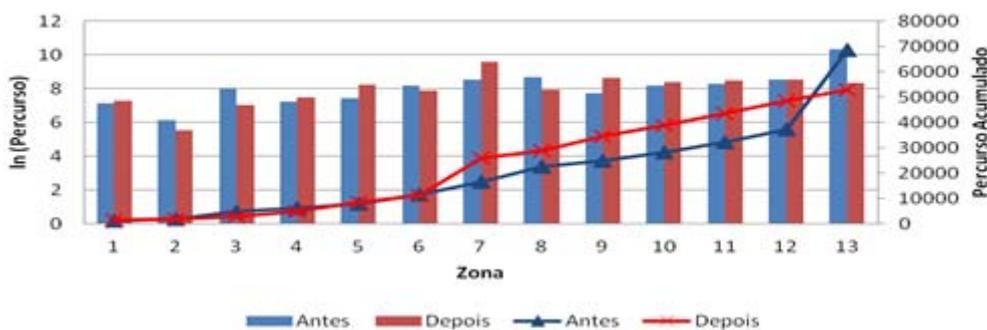


Figura 10. Análise do percurso das válvulas de COG antes e depois da resintonia ao longo das 13 zonas do FTT2. Gráfico em barras: valor por zona; gráfico em linha: valor acumulado.

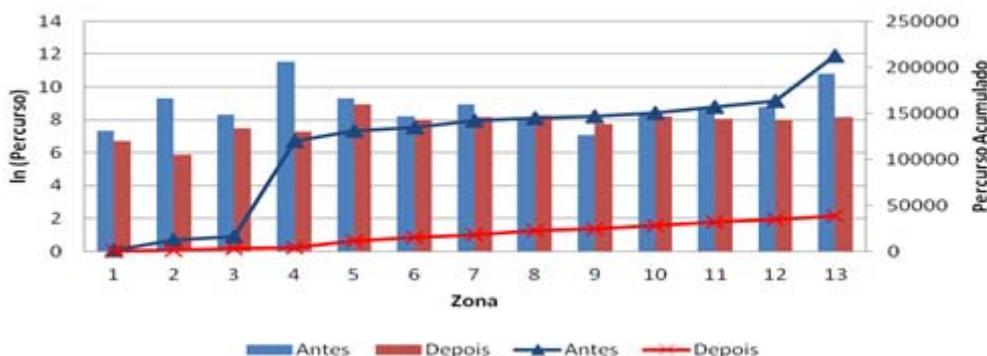


Figura 11. Análise do percurso das válvulas de ar antes e depois da ressintonia ao longo das 13 zonas do FTT2. Gráfico em barras: valor por zona; gráfico em linha: valor acumulado.

A ressintonia também impactou no consumo de COG, que foi reduzido em 8,44%, e no de ar, que foi reduzido em 8,57%, como mostram as Figuras 12 e 13.

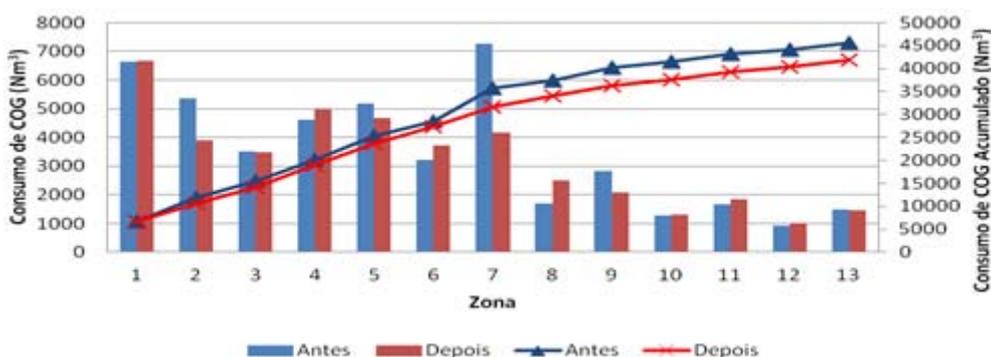


Figura 12. Análise do consumo de COG antes e depois da ressintonia ao longo das 13 zonas do FTT2. Gráfico em barras: valor por zona; gráfico em linha: valor acumulado.

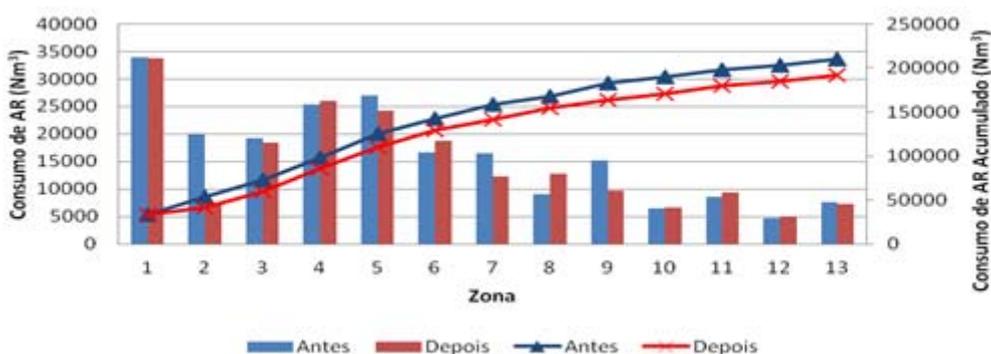


Figura 13. Análise do consumo de ar antes e depois da ressintonia ao longo das 13 zonas do FTT2. Gráfico em barras: valor por zona; gráfico em linha: valor acumulado.

3.2 Análise a longo prazo

A comparação a longo prazo não se baseou na análise momentânea pré e pós-ressintonia, mas na análise entre dias espaçados entre si. Como as condições operacionais do FTT2 são diferentes para dias diferentes, a constância das condições de carregamento não puderam ser consideradas.



As ressonâncias foram feitas nos dias 27/09/2011 e 28/09/2011. Desta forma, foi feita a comparação de performance do forno no dia 10/10/2011, representando o caso de pós-ressintonia, com os dias 03/08/2011 e 14/09/2011, representando os casos de pré-ressintonia. Portanto, todas as medidas quantitativas neste comparativo foram normalizadas em função da produção (por tonelada), calculando-se os percursos específicos das válvulas de ar e gás e os seus respectivos consumos específicos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Comparativo entre 3 cenários analisados a longo prazo quanto ao percurso específico das válvulas e do consumo específico de gás COG e ar

	Percurso específico (l/ton)			Consumo específico (Nm ³ /ton)		
	03/08/2011	14/09/2011	10/10/2011	03/08/2011	14/09/2011	10/10/2011
Gás COG	1871,35	948,71	431,42	186,64	209,71	174,60
Ar	1435,72	1009,95	249,29	968,84	1140,0	962,16

De acordo com o exposto na Tabela 4, entre os dias 03/08/2011 e 10/10/2011 houve redução de 76,95% no percurso específico das válvulas de COG e redução de 82,64% nas válvulas de ar. O consumo específico de COG reduziu em 6,45% e o de ar reduziu em 0,69%. Entre os dias 14/09/2011 e 10/10/2011 houve redução de 54,53% no percurso específico das válvulas de COG e redução de 75,32% nas válvulas de ar. O consumo específico de COG reduziu em 16,74% e o de ar reduziu em 15,60%. Em todos os casos comparados, houve melhorias associadas tanto com a redução do percurso específico das válvulas quanto com a redução do consumo específico dos gases.

A redução no consumo de gás COG pelo FTT2 foi superior a 6% para todos os casos analisados, sendo uma quantia superior à apresentada no trabalho de Wang.⁽¹⁰⁾

É importante ressaltar também que a ressonância dos controladores de vazão PI do FTT2 atenderam às restrições operacionais do forno.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstra como relativamente pequenas alterações – a ressonância das malhas de controle de vazão do FTT2 por meio da aplicação de teoria básica de controle – podem surtir efeitos benéficos tanto do ponto de vista econômico e ambiental, com a redução do consumo de gases, quanto do ponto de vista de manutenção, com a redução do percurso das válvulas pneumáticas.

Descontando-se o tempo de desenvolvimento da rotina matemática no MATLABTM, destinada exclusivamente para a ressonância das malhas de vazão do FTT2, todo o procedimento de ensaios, manutenção e ressonâncias podem ser feitos em aproximadamente 4 dias corridos para as 26 malhas do forno.

Cabe ressaltar ainda que a metodologia descrita pode ser implementada em qualquer outra linguagem de programação que não seja o MATLABTM.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Colegiado de Controle e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais que estimulou a realização deste projeto junto à empresa Usiminas. Agradecimentos à Gerência Geral de Engenharia de Processos Industriais, à Gerência de Instrumentação e à equipe de Instrumentação da Laminação a Quente pela abertura, receptividade e apoio ao projeto durante o período de estágio do primeiro autor deste trabalho.



REFERÊNCIAS

- 1 TEIXEIRA, M. H.; JOTA, F. G.; CARMO, R. A.; OLIVEIRA, C. A. S. Aplicação de Controle Avançado nos Fornos de Reaquecimento de Placas da Linha de Tiras a Quente da Usiminas. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, Julho 2007: p. 30-35.
- 2 VIDIGAL, C. H. Modelagem e Controle das Malhas de Temperatura do Pré-Aquecimento de um Forno de Reaquecimento de Placas da Usiminas. Monografia Final de Curso, Belo Horizonte: UFMG, 2004.
- 3 ANTUNES, B. de A. Sintonia de malhas fechadas do Lingotamento Contínuo 1 da Aciaria 2. In: VII SEMINÁRIO DO U-IPH (apresentação), 2008, Ipatinga.
- 4 SANTOS, R. F.; CORRÊA, M. V.; TEIXEIRA, R. de A. Implementação da Técnica de Controle Neural Adaptativo Híbrido Indireto numa Malha de Vazão das Plantas de Regeneração de Ácido Clorídrico da Usiminas. In: 14º SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS. Outubro de 2010, Belo Horizonte. São Paulo: ABM, 2010 p. 105-116. CD 1.
- 5 DUARTE, O. F.; OLIVEIRA, C. A. S. Manual de treinamento de instrumentação do forno de tratamento térmico N° 2 e máquina de têmpera. Manual de operações. Ipatinga: Grupo B - Manutenção, Eq. Instr. - Usiminas, 1986.
- 6 ANDRADE, C. A. R.; OLIVEIRA, C. A. S. de O.; CRUZ, G. M. Modernização do Sistema de Controle do Forno de Tratamento Térmico N° 2 da Usiminas. In: VIII SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS. Outubro de 2004, Belo Horizonte. São Paulo: ABM 2004, p. 1-8.
- 7 ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. PID Controllers - Theory, Design, and Tuning. ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2nd Edition, 1995.
- 8 KO, H. S.; KIM, J.; YOON, T.; LIM, M.; YANG, D. R.; JUN, I. S. Modeling and Predictive Control of a Reheating Furnace. **Proceedings of the American Control Conference**. Chicago, Illinois. p. 2725-2729. June 2000.
- 9 BALBIS, L.; BALDERUD, J.; GRIMBLE, M. J. Nonlinear Predictive Control of Steel Slab Reheating Furnace. **Proceedings of the American Control Conference**. Seattle, Washington, USA. p. 1679-1684. June 2008.
- 10 WANG, Z.; SHAO, C.; CHAI, T. Application of Multivariable Technique in Temperature Control of Reheating Furnaces. **Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications**. Kohala Coast-Island of Hawaii. Hawaii, USA, p. 29-32. August 1999.
- 11 RODRIGUES, D. D.; BEHRING, H. S. B.; OLIVEIRA J. C.R.; JOTA; F. G. Uma metodologia prática e simples para análise e projeto de controladores PID. **InTech Brasil**, p. 24-33. Janeiro 1999.
- 12 SABIONI, C. L.; DOMINGOS, G.; JOTA, F. G. Modelagem e Otimização do Sistema de Controle de Temperatura do Forno de Tratamento Térmico N° 2 da Laminação de Chapas Grossas da Usiminas. Monografia Final de Curso, Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- 13 SEBORG, D.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics Control. John Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition, 2004.