

MELHORIAS NO CONTROLE DE TEMPERATURA DO FORNO DE REAQUECIMENTO DA LAMINAÇÃO CONTÍNUA DA V&M DO BRASIL¹

Vinícius Mendes Cimini²
Fábio Gonçalves Jota³
Paulo José Junqueira⁴

Resumo

O trabalho desenvolve uma metodologia simples de projeto para o controle de temperatura de um forno de reaquecimento. Além disso, trás observações sobre a interferência entre malhas de controle (acoplamento). A metodologia se baseia na modelagem matemática das respostas dinâmicas dos sistemas mais importantes utilizando o método da Resposta Complementar, projeto e simulação de novos controladores PID e implementação no sistema real. Além da redução da variabilidade nas variáveis controladas, que acarreta um produto final de maior qualidade, foi obtida uma redução no consumo de gás que, evidentemente, é uma fonte de custos indesejável no processo. Além disso, os modelos, derivados de medidas reais do forno, permitiram se compreender melhor as relações de causa-e-efeito e, portanto, um ajuste melhor das condições de operação.

Palavras-chave: Forno de reaquecimento; Modelagem; Melhoria de desempenho.

IMPROVEMENTS IN TEMPERATURE CONTROL OF REHEATING FURNACE OF CONTINUOUS MILL OF V&M DO BRASIL

Abstract

This paper develops a simple project methodology of temperature control of a reheating furnace. Further, brings observations about control loops interferences (coupling). The methodology is based on mathematical modeling of dynamics responses of most important systems, design and simulation of new controllers and implementation on the real system. Besides the reduction of variability in controlled variables that brings to a final product with better quality, it was achieved a reduction of gas consumption that, obviously, is an undesired worth source in the process. Besides, the mathematical models are good ways to better know the cause-effect relationship and, thus, a better adjustment of operating conditions.

Key words: Reheating furnace; modeling; improving performance

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Engenheiro de Controle e Automação. Auxiliar Técnico. V&M do Brasil.

³ Pós-doutor em Controle de Processos. Professor Titular Dep. Eng. Eletrônica. UFMG.

⁴ Engenheiro Eletrônico. Analista de Automação. V&M do Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O forno de reaquecimento (NWO) é utilizado durante o processo produtivo de tubos sem costura da V&M do Brasil para elevar a temperatura do material que é laminado no Laminador Estirador Redutor (SRW). Esse forno é dividido em 12 zonas, sendo 6 na entrada e 6 na saída. Cada zona deve ter uma temperatura especificada, podendo ser igual ou diferente às demais. No entanto, não existe separação física entre elas.⁽¹⁾

Este trabalho visa realizar um estudo sobre as malhas de controle do forno para identificar possíveis melhorias em questão de consumo e qualidade. O estudo baseia-se na identificação das potenciais malhas a serem sintonizadas, a modelagem matemática das malhas identificadas, sintonia dos controladores de acordo com critérios de projeto, proposição de métodos de desacoplamento e avaliação de resultados.

Para o caso específico de sintonia de controladores de temperatura em fornos de reaquecimento,⁽²⁾ utiliza uma metodologia simples de projeto e consegue uma redução no consumo de combustível de 3,7%.

Para desacoplamento, encontra-se na literatura⁽³⁾ uma implementação experimental que obteve êxito utilizando desacopladores e modelos de primeira ordem com atraso de tempo.

Åstrom e Hagglund⁽⁴⁾ destacam que, apesar de o algoritmo PID já ser bastante conhecido, os controladores são frequentemente mal sintonizados, o que pode ser constatado na sala de controle de qualquer indústria através da observação de gráficos de tendência das variáveis de processo. Na maioria dos controladores PID em funcionamento, a ação derivativa é frequentemente desligada devido ao simples fato de que sua sintonia correta é difícil. A experiência de consultoria do Grupo de Controle de Processos Industriais da UFMG mostra que, muito frequentemente, os ganhos dos controladores são reduzidos de forma a anular oscilações. A consequência óbvia é que o sistema não oscila, mas também não acompanha alterações de setpoint ou compensa adequadamente mudanças de carga.

2 METODOLOGIA

As malhas escolhidas para o projeto foram as 12 de temperatura por se tratar do objetivo final de controle e afetar a qualidade do material e a de vazão de gás misto, pelo elevado gasto devido ao consumo. A modelagem do sistema em questão foi feita utilizando-se o método da Resposta Complementar.⁽⁵⁾ Os controladores foram projetados a partir dos modelos do sistema utilizando o método da Síntese Direta.⁽⁶⁾ Em seguida, os parâmetros projetados foram implementados na planta real e feito um ajuste fino por tentativa e erro de forma a melhorar sutilmente seu desempenho.

Após essa etapa, os desempenhos dos novos controladores foram comparados com os dos antigos. Essa comparação foi feita por meio dos índices de desempenho⁽⁷⁾ ITSE, IAE, ISE e ITAE para mudança de setpoint e histogramas para rejeição à perturbação.

Terminada a etapa de sintonia dos controladores, passou-se à análise do acoplamento entre as zonas por meio da matriz de ganhos relativos⁽⁸⁾. Quando as interações entre as malhas de controle passam a ser problemáticas, as seguintes alternativas devem ser consideradas:⁽⁶⁾ dessintonizar um ou mais controladores;

selecionar outros pares de variáveis controladas e manipuladas; empregar um compensador de desacoplamento; e usar um esquema de controle multivariável. Todas essas soluções, exceto a última, foram avaliadas.

A Figura 1 (esquerda) mostra o teste aplicado na Zona 1 no momento em que todas as outras variáveis manipuladas eram constantes. Já a parte direita mostra os resultados de validação do modelo. Para as outras 11 zonas, o método foi o mesmo.

O primeiro passo foi identificar o intervalo de tempo que seria utilizado. O único degrau de subida, ocorrido no instante 152,8 minutos, foi utilizado para o modelo e um dos degraus de descida foi utilizado para a validação. Em seguida foi feita uma normalização nos valores das variáveis manipulada e controlada de forma a terem seu ponto de partida em 0 e de chegada em 100. Por fim, o eixo das abscissas foi deslocado de forma que o instante de aplicação do degrau fosse considerado o instante zero da curva analisada.

O segundo passo consiste em traçar o gráfico de $\ln(1-y/u)$, onde y é a variável controlada e u a variável manipulada em questão, normalizadas. Com esse gráfico, é aproximada uma reta, é extraída sua inclinação e também o instante de tempo em que ela cruza o eixo das abscissas. A Figura 2 mostra o gráfico e a reta descritos. O resultado da inclinação obtida foi $a = 0,42$ e tempo morto $b = 1,2 \text{ min}$.

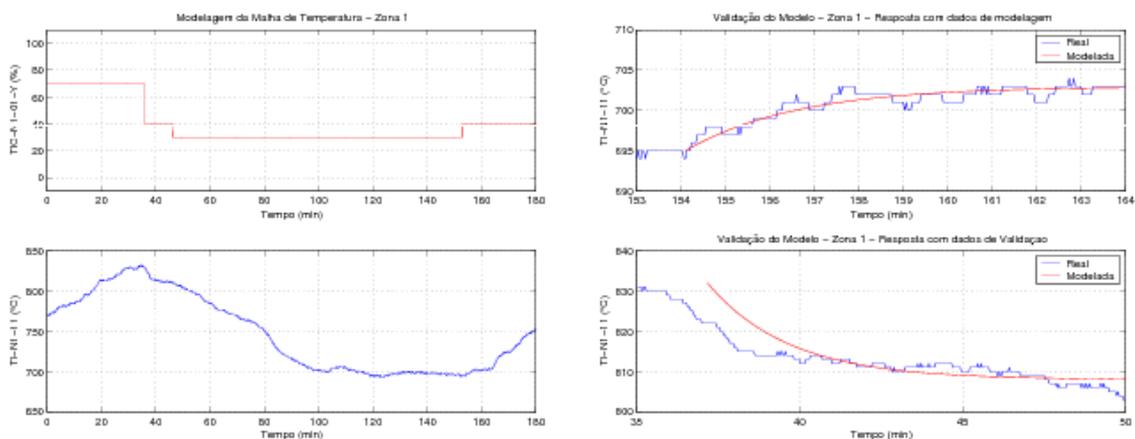


Figura 1: Dados de teste (esq) e validação do modelo (dir) da Zona 1.

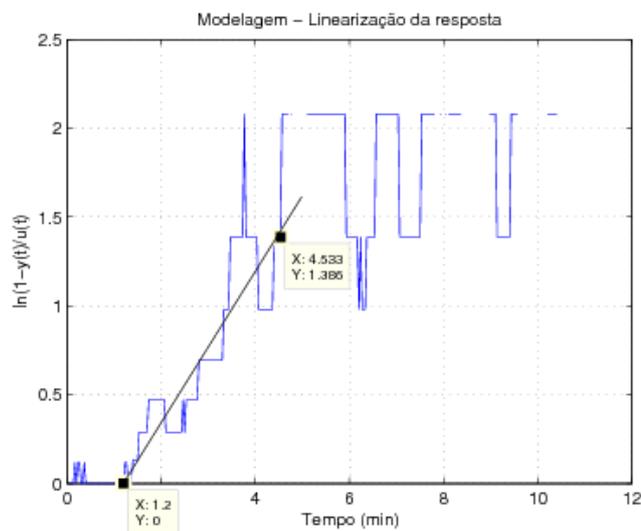


Figura 2: Linearização da resposta ao degrau para Zona 1.

Devido ao gráfico logarítmico poder ser aproximado por uma reta, o sistema foi considerado como sendo de primeira ordem e foi obtida a constante de tempo como sendo o inverso da inclinação. Ou seja, $\tau_{11} = 2,38 \text{ min}$.

Por fim, utilizando a forma no domínio de Laplace da Equação 1, procedeu-se à conferência dos resultados, conforme mostra a Figura 3. Percebe-se que a resposta dominante do modelo, quando comparada à resposta real, é muito bem aproximada, o que mostra a eficácia do método.

O ganho da função de transferência é calculado a partir dos ganhos individuais na normalização, ou seja, $K = K_{in}/K_{out}$, sendo K_{in} o ganho de normalização da variável manipulada e K_{out} o ganho de normalização da variável controlada.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-bs}}{\tau_{11} s + 1} \quad (\text{Eq. 1})$$

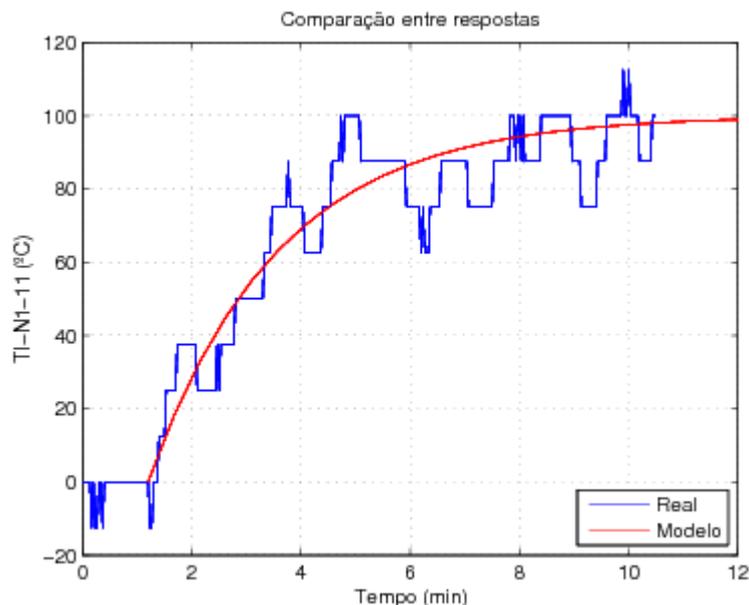


Figura 3: Conferência dos parâmetros encontrados da resposta ao degrau para Zona 1.

A partir da aplicação do método da resposta complementar nos dados da Figura 1 (esquerda), refinado por tentativa e erro, obteve-se um modelo de primeira ordem com atraso de tempo mostrado na Equação 2.

$$G_{CM}(s) = \frac{0,80 e^{-1,30s}}{2,50s + 1} \quad (\text{Eq. 2})$$

A validação do modelo é feita visualmente pela parte direita da Figura 1.

Para todas as outras zonas foi feito o mesmo procedimento de forma a se levantar os modelos.

Uma outra malha de controle que foi analisada foi a de pressão de gás misto. A partir da aplicação do método da resposta complementar, refinado por tentativa e erro, obteve-se o modelo de primeira ordem mostrado na Equação 3.

$$G_{GM}(s) = \frac{4,67e^{-0,33s}}{1,67s + 1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Uma análise do processo mostrou que, apesar das condições variarem bastante com o tipo de carga, em média, podia ser considerado que com os controladores antigos a resposta demorava de 15 a 20 minutos para atingir um novo valor de setpoint. Com esse dado em mente, a decisão de projeto foi que as novas respostas deveriam atingir o setpoint por volta de 9 min. Logo, a constante de tempo de projeto foi de 3 min ($1/3 \times 9$ min)⁽⁸⁾.

Para o controle de pressão, não é desejável um controlador muito rápido, já que pode causar variações bruscas na válvula e, conseqüentemente, na pressão dos queimadores. Uma constante de tempo do sistema controlado a 40% da constante de tempo em malha aberta é um bom valor para início de projeto. Portanto, a constante de tempo do controlador é 0,67min.

A partir dos modelos obtidos é feita a sintonia dos controladores com ação proporcional e integral. Esses novos ajustes são baseados no método da síntese direta⁽⁸⁾.

O projeto foi feito para uma região de operação diferente da utilizada durante a produção, quando as temperaturas são mais altas. Já era sabido que o ganho da planta real operando em torno de 1000°C era maior que o do modelo e foi feita uma diminuição nos ganhos proporcionais de todos os controladores de forma a evitar que a resposta oscilasse quando o setpoint era mantido fixo. A Tabela 1 mostra os controladores que foram realmente utilizados durante a fase de avaliação de desempenho.

Tabela 1: Modelos e controladores para malhas de temperatura

Zona	Modelo		Controlador		
	K	τ (min)	θ (min)	K_p	T_i (min)
1	0,80	2,50	1,30	0,73	2,50
2	1,80	3,33	1,30	0,43	3,33
3	2,30	5,88	0,27	0,78	5,88
4	3,10	5,00	0,70	0,44	5,00
5	1,30	3,03	2,50	0,42	3,03
6	-	-	-	-	-
7	0,60	0,67	1,00	0,60	1,67
8	0,80	3,33	1,40	0,65	3,33
9	1,70	5,00	1,00	0,50	5,00
10	1,13	3,33	1,00	0,48	3,33
11	1,60	2,30	0,30	0,44	2,30
12	0,33	1,25	1,00	0,84	1,25

A Tabela 2 mostra o modelo e o controlador projetado para a malha de pressão de gás misto. As análises das variáveis manipuladas foram omitidas, mas foi possível perceber que o comportamento era suave e, portanto, realizável fisicamente tanto para malhas de temperatura quanto para pressão.

Tabela 2: Modelo e controladores para malhas de pressão de gás misto

Modelo			Controlador	
K	τ (min)	θ (min)	K_p	T_i (min)
4,6	1,67	0,33	0,36	1,67

Como, por observação, era suspeitado que o maior emparelhamento ocorresse entre zonas frontais, a temperatura em função do tempo de duas zonas de frente uma para outra foram colocadas no mesmo gráfico de forma a comparar o comportamento das temperaturas quando apenas uma variável manipulada tinha seu valor alterado. O resultado dessa comparação entre a Zona 1 e 7 é mostrado na Figura 4. Os resultados para outras zonas frontais foram omitidos por serem análogos.

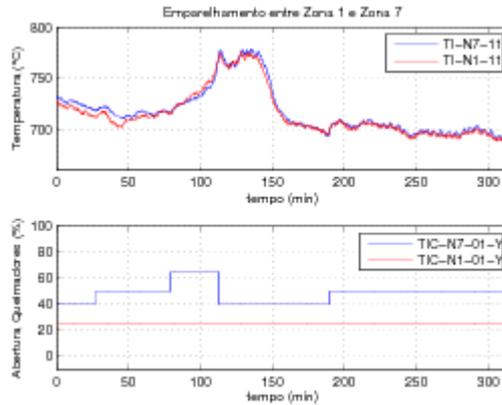


Figura 4: Comparação entre temperaturas de zonas opostas.

Os cálculos das matrizes de ganhos relativos ⁽⁷⁾ das Equações 4, 5, 6 e 7 indicaram o que visualmente já era percebido: o acoplamento entre zonas frontais era muito grande.

$$\Lambda_{2-8} = \begin{bmatrix} 3 & -2 \\ -2 & 3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\Lambda_{3-9} = \begin{bmatrix} 2,6 & -1,6 \\ -1,6 & 2,6 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\Lambda_{4-10} = \begin{bmatrix} 1,9 & -0,9 \\ -0,9 & 1,9 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\Lambda_{5-11} = \begin{bmatrix} 30,3 & -29,3 \\ -29,3 & 30,3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 7})$$

A análise das MGRs mostra que o valor da coluna 1, linha 1 de todas as matrizes é muito maior que 1, mesmo sendo o melhor caso. Para o pior caso, que é o que deve ser considerado para o projeto de controladores, a matriz tem seu primeiro elemento tendendo para infinito, já que a Figura 4 mostra que os valores mínimos das diferenças entre os ganhos foi praticamente 0 em todos os casos.

Como as relações de emparelhamento entre zonas frontais tenderam para $\lambda = -\infty$, para que a malha de uma zona operasse em automático seria necessário reduzir o ganho do controlador da outra zona. Além disso, indica que as malhas de controle sofrem severas interações. Esse resultado, apesar de abstrato, fornece um bom indicativo da dificuldade em controlar duas zonas frontais ao mesmo tempo. Mesmo considerando o modelo de acoplamento exagerado e reduzindo um pouco o ganho dos emparelhamentos de uma zona em outra, sempre o resultado é um λ

muito maior que 1, significando que esse processo, da forma como está, é muito difícil de ser desacoplado via sistema de controle.

Dentre as quatro estratégias de desacoplamento citadas, apenas a última não foi tratada por ter uma implementação mais trabalhosa. No entanto, os métodos de desacoplamento não foram eficientes.

Foram feitas simulações via computador e os resultados confirmaram essa dificuldade de controle. A Figura 5 ilustra essa afirmação, já que sempre uma variável manipulada se fechava enquanto a outra passava a controlar sozinha, indicando a dificuldade de se ter um controle duplo ao mesmo tempo.

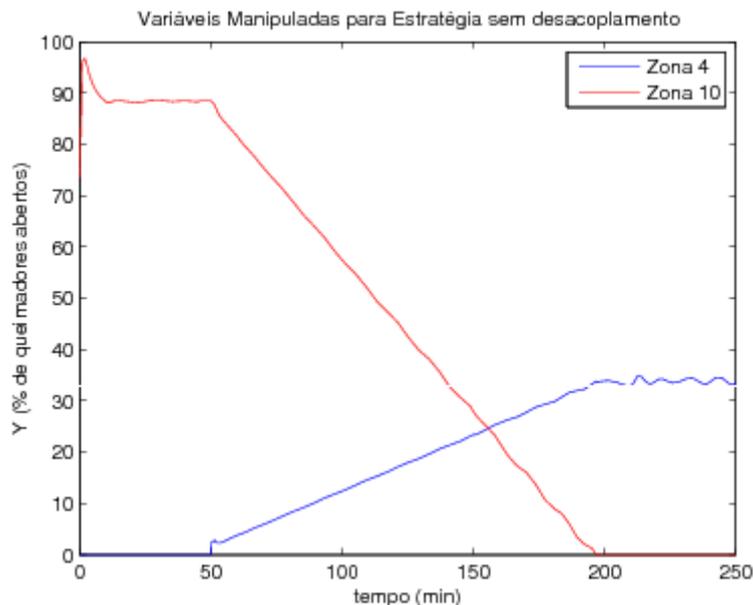


Figura 5: Simulação de Variáveis Manipuladas usando estratégia de desacoplamento.

Sendo assim, ficou clara a necessidade de algum desacoplamento físico, já que apenas controladores e desacopladores para cada zona não conseguiriam a ação de controle necessária.

3 RESULTADOS

As melhorias nas malhas foram avaliadas para duas situações distintas. A primeira delas levou em consideração a rejeição à perturbação e, a segunda, a capacidade do sistema de controle em levar a variável controlada a um novo valor após a mudança do setpoint.

A Figura 6 mostra os resultados para as zonas de 7 a 12. Graficamente percebe-se que houve uma redução significativa na variabilidade das temperaturas em torno do setpoint. A fim de quantificar os resultados, essas curvas foram consideradas aproximações da curva de Gauss cujas médias e desvios-padrão são mostrados na Tabela 3. Pelos dados é possível notar que todas as médias se aproximaram dos valores de referência e todos os valores de dispersão diminuíram.

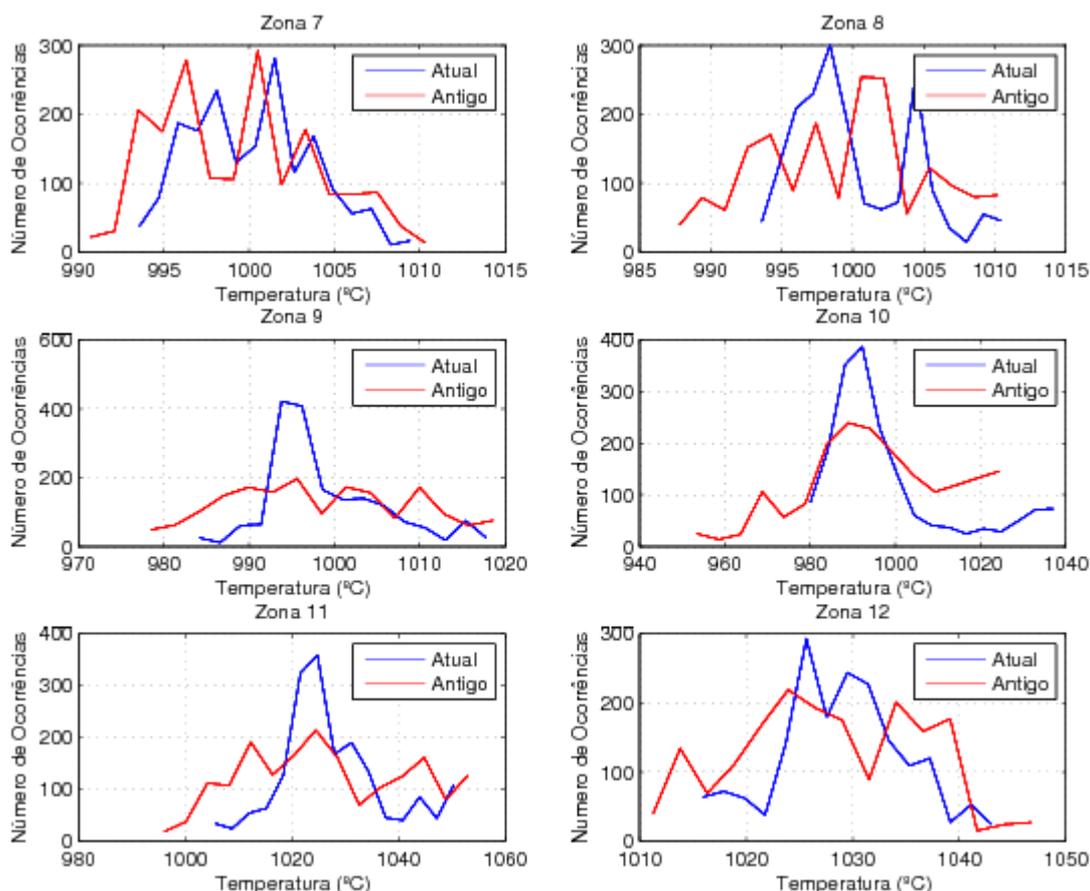


Figura 6: Comparação entre desempenho antes e após a sintonia das malhas para rejeição à perturbação.

Tabela 3: Avaliação de desempenho para rejeição à perturbação

Zona	setpoint	Proposto		Original	
		Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
7	1000	1000,2	3,58	999,6	4,57
8	1000	1000,3	4,25	999,5	5,84
9	1000	999,1	6,95	998,4	10,59
10	1000	998,4	15,07	995,9	16,87
11	1030	1028,0	10,29	1026,7	14,85
12	1030	1028,8	6,33	1027,7	8,31

A Figura 7 mostra a comparação entre mudanças de setpoint antes e depois da sintonia dos controladores. É possível perceber que ao contrário do projeto, existe uma oscilação de 4 a 6 ciclos na resposta em malha fechada. Além disso, o tempo de acomodação projetado de 10 minutos na realidade ficou em torno dos 15 minutos. Isso ocorreu devido às imperfeições do modelo e perturbações severas no processo. No entanto, é possível notar uma redução significativa nos tempos de acomodação e diminuição do overshoot em comparação com os controladores originais.

Com o objetivo de avaliar quantitativamente os resultados, foram utilizados ⁽⁸⁾ os índices IAE, ISE, ITAE e ITSE. As comparações encontram-se na Tabela 4, onde é possível perceber uma expressiva diminuição em todos os índices, indicando um controlador mais eficiente.

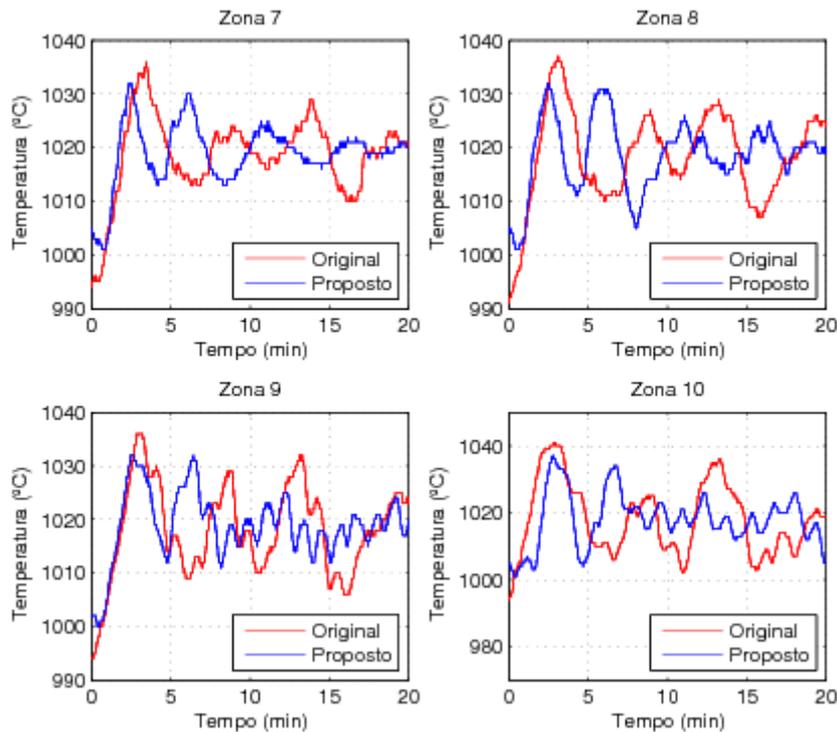


Figura 7: Comparação entre desempenho antes e após a sintonia das malhas para mudança de setpoint.

Tabela 4: Avaliação de desempenho para mudança de setpoint

Zona	IAE		ISE		ITAE		ITSE	
	Antigo	Novo	Antigo	Novo	Antigo	Novo	Antigo	Novo
7	0,06	0,05	0,7	0,4	26,7	16,6	177,2	77,3
8	0,08	0,06	0,9	0,6	39,3	22,8	308,1	146,7
9	0,09	0,06	0,9	0,5	43,2	22,8	371,1	122,4
10	0,11	0,07	1,5	0,8	60,3	32,6	700,3	255,4

Em relação à malha de pressão de gás misto, com a proposta do novo controlador, mais rápido, passou a ser possível a utilização do controlador com um setpoint mais baixo, já que caso ocorresse uma queda brusca na pressão da linha de gás, o controlador seria capaz de recuperar a pressão e não bloquear o forno.

A Figura 8 mostra o comportamento da pressão de gás misto em dois dias diferentes: um antes e outro após a sintonia do controlador.

Essas características proporcionaram menos perturbações na pressão, que refletem diretamente na temperatura. Além disso, por operar com uma pressão mais baixa, há redução no consumo de gás.

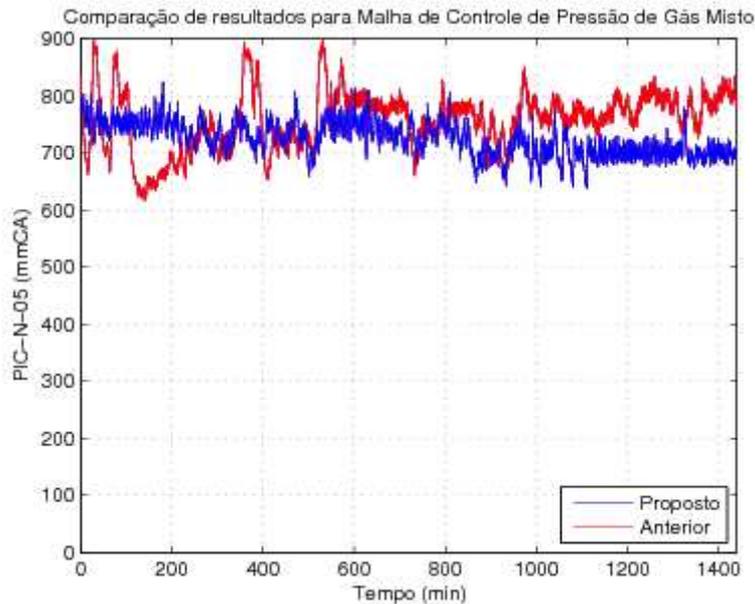


Figura 8: Comparação entre desempenho antes e após a sintonia das malhas para setpoint fixo.

4 DISCUSSÃO

Não foi possível estabelecer uma relação quantitativa entre os métodos de sintonia aplicados e a redução no consumo de combustível. Isso porque o final do trabalho coincidiu com um período de mudanças na produção ao qual o forno ficou algum tempo ligado sem produzir. Ainda assim, foi possível passar a operá-lo apenas com gás de alto-forno (produto interno) e não mais com alto volume de gás natural (comprado).

Alguns trabalhos na área de controle de fornos de aquecimento foram propostos. Teixeira⁽⁹⁾ indica uma diminuição na atividade das variáveis manipuladas e diminuição no tempo de resposta das variáveis controladas para malhas de vazão e temperatura. Para chegar a esses resultados foi feito um aumento nos ganhos proporcionais e redução nos tempos derivativos e integrais. Já Zana⁽¹⁰⁾ utiliza, além da sintonia das malhas, uma estratégia de controle em cascata e consegue controladores com desempenhos superiores aos PIDs convencionais em termos de controle de temperatura e vazão de combustível. O presente trabalho corrobora com os bons resultados das técnicas de controle já que também consegue melhorar os tempos de resposta dos controladores sem comprometer o funcionamento das variáveis manipuladas. Isso foi conseguido aumentando tanto os ganhos proporcionais quanto os tempos integrais dos controladores.

Devido a um hiato existente entre engenheiros de controle e os processos metalúrgicos, as análises encontradas param nesse ponto. Apesar do presente trabalho não contemplar, foi possível perceber benefícios do controle de temperatura além do forno: no laminador. Análises posteriores aos resultados indicaram uma sensível diminuição no desvio-padrão de rotação dos motores do laminador. Como a rotação está diretamente relacionada com a deformação do material, existe a possibilidade, embora não confirmada até o momento, de que tenha havido alguma melhora na qualidade.

5 CONCLUSÃO

No atual contexto de concorrência mundial que a indústria brasileira está inserida, torna-se cada vez mais importante a melhoria dos processos. Sob esta ótica, a Engenharia de Controle pode desempenhar papel chave já que consegue aumentar índices de desempenho muitas vezes apenas alterando parâmetros de controladores, sem gastos com equipamentos.

A metodologia utilizada para sintonia de malhas de controle no presente trabalho tem-se mostrado eficiente em muitos casos em que é aplicada. Além disso, tem a vantagem de ser uma forma simples e rápida de determinação dos parâmetros dos controladores, podendo ser utilizada pelo corpo técnico com menos qualificação em Controle de Processos.

Foi feita também uma análise das relações de emparelhamento entre as diversas zonas do forno de forma a avaliar a possibilidade de controle de cada zona separadamente, reduzindo o acoplamento entre elas. Com os controladores sintonizados para as malhas de temperatura, de forma geral, foi possível obter uma diminuição no tempo de resposta e redução do nível de overshoot quando ocorrem mudanças no valor de referência. Além disso, foi obtida uma redução da variabilidade e aproximação do valor médio em relação ao desejado para valores de referência fixos. Essas melhorias foram conseguidas aumentando tanto o ganho proporcional quanto o tempo integral dos controladores.

Com a sintonia do controlador de pressão de gás misto foi possível operar com níveis de pressão mais baixos, o que pode acarretar uma diminuição no consumo. Além disso, a resposta com o novo controlador se mostrou com menor variabilidade em torno do valor de referência, o que acarreta diretamente uma melhoria no controle de temperatura já que a pressão variável é uma fonte de perturbação para a malha de temperatura.

A partir do estudo das relações de emparelhamento entre as variáveis manipuladas e controladas das 12 zonas foi possível concluir que apenas o sistema de controle não era suficiente para que todas as zonas fossem controladas independentemente. Eram necessárias, além da aplicação de métodos de desacoplamento, decisões a nível operacional, principalmente na definição dos valores de referência para as zonas de entrada, de forma a garantir a possibilidade física do controle.

No dia 01/11/2008, durante a Grande Parada da Laminação Contínua, foi introduzida uma manta térmica para separar as zonas de entrada das de saída. Conforme previsto nesse trabalho, o maior acoplamento ocorria entre zonas frontais e essa separação física teve como objetivo reduzi-lo. Testes nos dias seguintes indicaram uma melhora sensível no sistema de controle, inclusive com a possibilidade de voltar a operar as malhas de controle de temperatura das zonas de entrada em automático. Foi possível perceber, logo no princípio, uma redução considerável no consumo de gás natural, já que apenas o gás de alto forno passou a ser capaz de suprir a demanda energética. No entanto, não se pôde determinar precisamente o peso, em termos de importância, que cada ação de melhoria no forno teve na melhora geral do processo, já que muitas ações no sistema foram feitas paralelamente.

REFERÊNCIAS

- 1 V. M. Cimini, F. G. Jota, P. J. Junqueira. Melhorias no Controle de Temperatura do Forno de Reaquecimento da Laminação Contínua da V&M do Brasil. *Monografia de Projeto Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação da UFMG*, 2008.
- 2 B. O. Teixeira, F. G. Jota e M. H. Teixeira. Modelagem, controle e otimização do processo de fornos de reaquecimento de placas. *Sociedade Brasileira de Automática*, 18:67-93, 2007.
- 3 B. S. Torres, F. G. Jota e R. T. Pena. Estratégias de desacoplamento em sistemas multimalha no controle de nível, vazão e temperatura. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, 18:991-997, Setembro 2002.
- 4 K. J. Aström and T. Hagglund. *Automatic Tuning of PID Controllers*. Instrument Society of America, 2 edition, 1988.
- 5 E.O. Doebelin. *Measurements Systems: Application and Design*. McGraw-Hill International, 2nd edition, 1990.
- 6 D. E. Seborg, T. F. Edgar and D. A. Mellichamp. *Process Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, 1989.
- 7 R. C. Dorf and R. H. Bishop. *Modern Control Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 11 edition, 2008.
- 8 E. H. Bristol. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-11(1):133-134, 1966.
- 9 B. O. Teixeira. Modelagem e Sintonia de Controladores para um Forno de Reaquecimento. *Monografia de Projeto Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação da UFMG*, page 115, 2004.
- 10 B. Zhang, Z. Cheng, L. Xu, J. Wang, J. Zhang and H. Shao. The modeling and control of a reheating furnace. *Proceedings of the American Control Conference*, 8(10):3823-3828, May, 2002.