

MELHORIAS NO CONTROLE DINÂMICO DOS FORNOS DE REAQUECIMENTO DE PLACAS DA LINHA DE TIRAS A QUENTE DA USIMINAS¹

Marcos Henrique Teixeira²
Fábio Gonçalves Jota³
Rogério Antônio do Carmo⁴
Carlos Augusto Souza de Oliveira⁵

Resumo

Este trabalho apresenta melhorias desenvolvidas no controle dinâmico dos fornos de reaquecimento de placas da Linha de Tiras a Quente da Usiminas. Para isso, foi utilizada uma metodologia que consistiu na modelagem, projeto e implementação de novas estratégias de controle das principais malhas que compõem o processo. Obteve-se um expressivo resultado no desempenho do forno, gerando uma redução mensal média de 3,7% no consumo do combustível, ou seja, uma economia mensal média aproximada de 301 mil litros de óleo.

Palavras-chave: Forno de reaquecimento; Controle avançado; Preditor de Smith; Matriz de ganhos relativos; Avaliação de desempenho.

IMPROVEMENT IN DYNAMIC CONTROL AT REHEATING FURNACE OF HOT STRIP MILL PLANTS OF USIMINAS

Abstract

In this paper it is presented the improvement developed in dynamic control in the reheating furnaces of the hot strip mill plant of Usiminas. To achieve it, a methodology consisting of the application of a systematic modeling, controllers design, simulation, implementation of new control strategies and performance assessment has been used on main loops of the process. The obtained results confirm the improvement in the control system's performance achieving an average fuel consumption saving of 3.7%. It means a monthly average saving of 301 thousand liters of oil.

Key words: Temperature control; Reheating furnace; Advanced control; Performance assessment

¹ Trabalho técnico apresentado ao X Seminário de Automação de Processos, 4 a 6 de outubro de 2006, Belo Horizonte – MG.

² Membro da ABM; Engenheiro Eletricista, MSc., Superintendência de Projetos, Instrumentação e Automação da Usiminas; Ipatinga, MG

³ Professor Titular do Departamento de Eletrônica da UFMG, PhD.

⁴ Supervisor de Operação, Superintendência de Laminação a Quente da Usiminas, Ipatinga, MG.

⁵ Supervisor de Instrumentação, Superintendência de Projetos, Instrumentação e Automação da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

A laminação de tiras a quente é o processo metalúrgico que tem como objetivo transformar placas em bobinas. Nesta transformação, diversos controles são efetuados visando produzir uma bobina que tenha as dimensões, forma e as características metalúrgicas e mecânicas requeridas pelo cliente. Um dos controles é de temperatura, que inicia nos fornos de reaquecimento, primeiro equipamento da linha. Esse equipamento é responsável por 15% do consumo total de combustível em uma usina siderúrgica integrada. Esse significativo consumo justifica a realização de estudos para que o forno de reaquecimento trabalhe de forma segura e contínua, atendendo às especificações técnicas do aquecimento das placas e consumindo o mínimo de combustível.

A Laminação de Tiras a Quente da Usiminas possui três fornos, dois do tipo *walking beam* (Fornos 4 e 5) e um *pusher* (Forno 3). Escolheu-se o Forno 4 para o desenvolvimento desse trabalho por apresentar o maior consumo de combustível. A área de controle desse forno é dividida em seis zonas, as quais são denominadas zonas de preaquecimento superior e inferior (codificadas 411 e 421, respectivamente), aquecimento superior e inferior (431 e 441) e encharque superior e inferior (451 e 461). Em cada uma dessas zonas existem queimadores (um total de 50 no Forno) que têm as vazões de combustível e de ar ajustadas de forma independente, através da abertura e fechamento de válvulas de controle. As zonas de aquecimento e encharque utilizam uma mistura de gases do processo, proveniente da coqueria, altos-fornos e aciaria. Para a zona de preaquecimento é mais usual queimar óleo atomizado com vapor de água, devido a disponibilidade de gases não ser suficiente para atender a demanda de produção.

Normalmente, dois níveis hierárquicos são empregados no controle de temperatura. No nível 1, a temperatura da zona é controlada através de controladores (TIC), que são interligados aos de vazão de combustíveis e de ar (FIC), numa configuração em cascata, via duplo limite cruzado. Termopares instalados dentro do forno coletam as temperaturas das zonas, que são utilizadas pelo sistema de otimização dos fornos (FCC) para o cálculo da temperatura da placa. No nível 2, o *setpoint* para essas zonas é definido pelo FCC, onde a estratégia de temperatura ótima é definida e enviada *online* para o DCS (Digital Control System). A premissa desta estratégia é que cada zona deve ser controlada por queimadores independentes. No entanto, como as zonas são interligadas, há uma interação entre elas gerando um grande atraso de tempo na resposta, afetando a performance do forno. Como o controle desconsidera o acoplamento entre as malhas de temperatura, é necessário avaliar o grau de acoplamento (perturbação) e definir ações para compensação desse acoplamento. Uma revisão bibliográfica sobre a modelagem matemática e estratégias que podem ser aplicadas a fornos de reaquecimento pode ser encontrada em Teixeira.⁽¹⁾

Uma das principais dificuldades desse sistema é manter a temperatura determinada, principalmente, quando ocorre a entrada de uma seqüência de placas frias. Após a implantação do sistema de otimização dos fornos, o problema de controle de temperatura no forno tornou-se ainda mais crítico, pois a cada dois minutos o FCC exige, da variável controlada, mudanças conforme o tipo de material que estiver sendo enforado. Quando o forno é submetido a um ritmo de produção intenso, onde os desenforamentos de placas são mais frequentes, ocorrem maiores desvios entre o *setpoint* (SP) e a variável controlada (PV) levando a zona de aquecimento a saturações no controle. Em algumas situações, o *setpoint* da zona do

preaquecimento é retirado do computador de processo e passa a ser definido manualmente pelo operador. Em outras situações operacionais, os controladores de temperatura são passados para modo manual e a variável de processo (vazão de combustível) é ajustada com a maior abertura possível, evitando o estrangulamento da válvula de controle. Há uma ação preventiva do operador no forno quando é prevista a entrada de material quente ou frio, ou quando é alterado o ritmo de produção. Essas manobras, apesar de necessárias, podem não ser eficientes do ponto de vista energético e do aquecimento das placas.

2 MODELAGEM DO PROCESSO

2.1 Metodologia

No sistema dinâmico e regulatório, o estado-da-arte no controle de fornos de reaquecimento de placas apresenta duas abordagens na busca de soluções para os problemas relacionados ao controle da temperatura da placa. A primeira refere-se a utilização de um sistema de otimização de fornos. A segunda, adotada neste trabalho, foi a de realizar uma sintonia das malhas de combustíveis e temperatura e investigar as novas técnicas de controle aplicadas a fornos de reaquecimento de placas, com o objetivo de minimizar a variabilidade do processo, reduzindo o consumo de energia no Forno 4 da Usiminas.

Para isto, foi empregada uma metodologia sistemática de projeto e sintonia dos controladores das malhas de vazão de gás, óleo e ar (FIC), e das malhas de temperatura (TIC). Essa metodologia consiste das fases de modelagem, projeto, simulação, implementação, avaliação de desempenho das malhas sintonizadas e proposição de novas estratégias de controle. Na fase de modelagem, algumas técnicas foram empregadas tais como os métodos da Resposta Complementar⁽²⁾ e dos Mínimos Quadrados.⁽³⁾ Além disso, diversos testes em malha aberta e fechada foram realizados visando-se obter modelos representativos do processo.

Na fase de projeto dos controladores, foram empregados os métodos da Síntese Direta⁽³⁾ e do Controle por Modelo Interno (IMC)⁽⁴⁾ e os modelos determinados na fase de modelagem para realizar a sintonia das malhas existentes. Foram utilizados controladores Proporcional-Integral (PI) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID), para as malhas de vazão e temperatura, respectivamente. A sintonia realizada visou tornar os controles mais rápidos, explorando a maior capacidade de resposta das válvulas e as características dinâmicas da temperatura em cada zona, adequando-os aos requerimentos de maiores demandas. Ainda nessa fase, foram avaliadas e identificadas quatro novas estratégias de controle: (1) aplicação da técnica de controle chaveado⁽³⁾ à zona do preaquecimento, considerando-se que na fase de modelagem da planta foi caracterizada a necessidade de três modelos para melhor representar a dinâmica dessa zona; (2) aplicação de controle antecipatório³ na zona do preaquecimento, utilizando-se dos modelos de perturbação das placas nas zonas; (3) emprego de Preditor de Smith⁽³⁾ na zona do encharque, considerando-se as funções de transferência e a relação observada entre a constante de tempo e o atraso puro de tempo ter sido maior que 0,5; (4) aplicação de projeto de desacopladores⁽³⁾ para a zona do aquecimento, considerando-se o forte acoplamento existente nessa zona. Para isto, foi utilizada a Matriz de Ganhos Relativos (MGR)⁽⁴⁾ para avaliar o melhor emparelhamento das variáveis de controle e o acoplamento das zonas.

Para avaliação (auditoria) das malhas de controle foram realizados diversos testes em malha fechada e utilizado um *Avaliador de Desempenho de Malhas de Controle*³, desenvolvido especialmente para esse fim pelo Grupo de Controle de Processos Industriais (GCPI) da UFMG.

2.2 Modelagem das Malhas de Vazão

Objetivando-se caracterizar a resposta dinâmica das malhas de vazão de combustível e de ar para as zonas, definiu-se um procedimento padrão que foi aplicado em todas as malhas. Os modelos determinados foram validados, obtendo-se em média 2 s como atraso puro de tempo e 4,0 s e 4,5 s como constantes de tempo de subida e de descida, respectivamente.

2.3 Modelos das Malhas de Temperatura

Foram implementados testes ao degrau em malha aberta e malha fechada. Variações de 10% foram aplicadas na variável manipulada durante descida e subida, simulando um sinal binário pseudo-aleatório (PRBS). Em malha fechada, foram geradas diversas variações no *setpoint*, através do computador de processo e, depois de definido o período de amostragem, foram identificados os parâmetros de cada zona por técnicas de mínimos quadrados, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos modelos obtidos para as malhas de temperatura.

Malha/Parâmetros	Unidade	TIC 411	TIC 421	TIC 431	TIC 441	TIC451	TIC 461
Ganho (K)	°C/%	0,11	0,12	0,66	0,74	2,80	3,84
Constante de tempo (τ)	s	365	525	106	122	88,5	90
Atraso puro de tempo (θ)	s	30	30	55	55	55	55

Além desses parâmetros dos modelos, que relacionam a influência da vazão na temperatura da zona, também foram determinados os modelos relativos às influências das temperaturas das placas e das temperaturas das outras zonas.

3 PROJETO DOS CONTROLADORES E DAS TÉCNICAS AVANÇADAS

3.1 Malhas de Temperatura

A partir das funções de transferência de primeira ordem com atraso puro de tempo e utilizando o método da Síntese Direta e do Modelo Interno (IMC), foram ajustados os valores de Banda Proporcional Normalizada (BPN), tempo integral (TI) e tempo derivativo (TD), que podem ser vistos na Tabela 2. Com os novos ajustes, houve um aumento de velocidade de até 3 vezes nestas malhas, o que foi avaliado através das simulações efetuadas e comprovado através dos testes reais no processo.

Tabela 2. Parâmetros dos controladores ajustados - malhas de temperatura.

Malha		TIC 411	TIC 421	TIC 431	TIC 441	TIC 451	TIC 461
Constante em malha fechada - τ_{MF} (s)		400	600	120	120	80	100
Ajuste Proposto	BP _N (%)	13	13	8,9	10,1	37,9	59,5
	T _I (s)	365	525	134	149,5	116	117
	T _D (s)	14,4	14,6	21,8	22,4	21	21
Ajuste original	BP _N (%)	30	30	30	20	38	35
	T _I (s)	180	180	200	300	220	150
	T _D (s)	50	50	50	40	60	60
Relação dos ajustes	$\frac{BP_N \text{ original}}{BP_N \text{ proposto}}$	2,30	2,30	3,37	1,98	1,00	0,59
	$\frac{T_{I-orig.}}{T_{I-prop.}}$	0,49	0,34	1,49	2,01	1,90	1,28
	$\frac{T_{D-orig.}}{T_{D-prop.}}$	3,47	3,42	2,29	1,79	2,86	2,86

3.2 Técnicas Avançadas

3.2.1 Controle chaveado

Inicialmente foi verificado que os modelos obtidos para a condição operacional em que a carga do forno era predominantemente de placas quentes tinham valores de ganho e constantes de tempo maiores que os obtidos para a condição operacional de carga predominantemente fria. Com base nessas diferenças de comportamento, relacionadas à temperatura de enfiamento de placas, foi proposta a implementação de uma estratégia de controle chaveado composta de três controladores para a zona do preaquecimento. O primeiro deles, chamado controlador *hot*, para a situação em que a carga era predominantemente quente. O segundo, chamado controlador *cold*, para a situação em que a carga era predominantemente fria. Já o terceiro, chamado controlador médio, atende as situações onde não há uma predominância na carga do forno.

Após diversas simulações, foram definidas as constantes de tempo de malha fechada que melhor atendessem à planta. Utilizando o controlador *hot* numa condição operacional de carga predominantemente fria a resposta do controlador ficou lenta. Por outro lado, o uso do controlador *cold* para carga quente provocou sobre-sinais. Concluiu-se assim que, esses controladores deveriam ser adotados nas malhas do preaquecimento superior (TIC-411) e inferior (TIC-421) somente para condições de carga onde houvesse predominância de carga mista. Para condições onde a carga do forno não fosse classificada como quente ou fria, foi adotado o projeto dos controladores PID definidos na Tabela 2 na linha do ajuste proposto. Os parâmetros dos controladores projetados para predominância de carga quente ou fria podem ser visto na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros das malhas do TIC-411 e TIC-421

Zona/Carga		Parâmetros dos controladores			
		τ_{MF} (s)	BP (%)	T _I (s)	T _D (s)
TIC411	Quente	400	14,2	350	14,4
	Frio	200	7,1	265	14,2
TIC421	Quente	600	10,7	806	14,7
	Frio	300	6,4	294	14,2

A implementação da técnica de controle chaveado envolveu a alteração nos dois níveis hierárquicos. O nível 2, que reconhece quais são as placas que estão

sendo enfiadas, ao identificar a situação da carga do forno, envia a informação para o nível 1. O nível 1 realiza a mudança nos parâmetros dos controladores utilizados, considerando ainda o tipo de combustível que estiver sendo queimado.

3.2.2 Controle antecipatório

Para melhorar o desempenho da zona do preaquecimento, além de um controlador PID bem sintonizado e do uso da técnica de controle chaveado, foi avaliado o uso das técnicas de controle antecipatório. O objetivo era reduzir o efeito da principal perturbação desta zona, a entrada de placas, podendo estas serem frias ou quentes.

Seborg⁽⁴⁾ relata que a qualidade de um controle antecipatório depende de se ter um modelo da planta bem representativo ou uma medida exata da perturbação. Baseado nos modelos de 1ª ordem que relacionam o efeito da entrada de placa no forno, foi projetado o controle antecipatório. As especificações de projeto para sintonia da malha e para o projeto dos controladores cold e hot buscaram atender aos requisitos de um controlador robusto. Assim, é esperado que o controlador responda lentamente para determinadas condições de operação do processo. Um controle antecipatório, baseado na entrada de placas na zona do preaquecimento, pode fazer com que essa lentidão seja compensada, aumentando a sensibilidade do controle sem provocar sobre-sinais.

Foram realizadas diversas simulações visando avaliar a aplicabilidade desta técnica no forno. Apenas para a zona do preaquecimento foi utilizada esta técnica, pois o efeito da entrada de placa nessa zona mostrou-se ser mais representativo. Como o modelo determinado indicou um ganho e uma constante de tempo, resolveu-se fazer o projeto desse controle considerando apenas a relação do ganho obtido do modelo da perturbação com o ganho da planta nesta zona. Nas simulações, variações em degrau no *setpoint* foram aplicadas ao sistema e, no mesmo instante, feita a previsão de entrada de placas frias no forno a cada 400 segundos. Comparou-se também o efeito na variável controlada (PV) utilizando apenas o controlador médio adicionado no controle antecipatório. Baseado no modelo obtido, foi definido um tempo de 395 segundos, que corresponde ao tempo que a placa começa a influenciar a temperatura da zona, excluindo-se o tempo morto da resposta do modelo referente a influência da vazão na temperatura da zona.

Comparando-se a resposta do sistema (PV-PID), com a resposta do controle antecipatório (PV-FEED), observa-se uma redução nas oscilações da variável controlada provocadas pela entrada das placas e uma ligeira redução no tempo de resposta do sistema, mostradas no gráfico superior da Figura 1. Para isto foi necessário um maior esforço da variável manipulada (MV-FEED), mostrada no gráfico inferior da Figura 1.

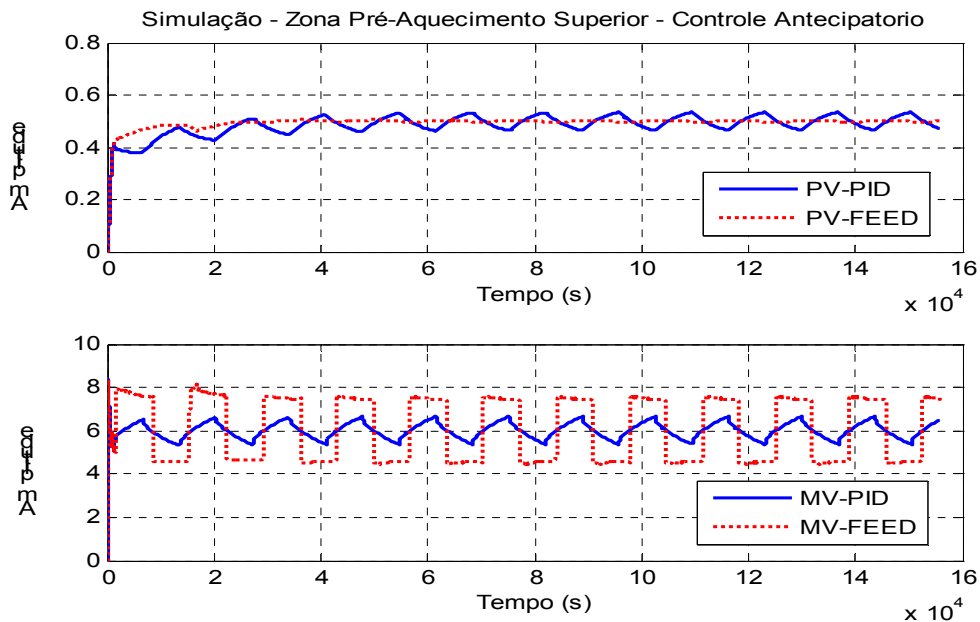


Figura 1. Resposta do simulador controle antecipatório x PID sintonizado.

A implementação da técnica de controle antecipatório, envolveu também os dois níveis hierárquicos. No nível 2, é identificado o evento de entrada da placa dentro do forno através da função de *tracking* que acompanha a placa desde o seu enformamento (movimento do empurrador) até o seu desenformamento (movimento do extrator). A entrada da placa é reconhecida no momento em que metade da placa entra na zona do preaquecimento. Neste momento, o nível 2 envia uma mensagem ao nível 1 solicitando a compensação desta perturbação na zona do preaquecimento que provoca uma ação na variável manipulada (MV) que é dada pela relação dos ganhos dos modelos.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1 Malhas de Vazão

Para todos os controladores, diversos testes em malha fechada foram efetuados para avaliação dos resultados. Alguns refinamentos nos ajustes propostos foram realizados na planta, visando-se obter a resposta desejada e atender às especificações de projeto previamente definidas.

Os projetos dos controladores de vazão proporcionaram redução do nível de atividade da variável manipulada e aumento da velocidade de resposta da variável controlada. Estes resultados foram alcançados com a diminuição dos valores de ganho proporcional e de tempo integral. Para as malhas de vazão de óleo do preaquecimento superior, o ganho proporcional aumentou. Com o tempo integral e ganho proporcional altos, os controles ficavam lentos. Assim, evitaram-se problemas de sobre-sinal e de comportamento inadequado dos elementos atuadores.

4.2 Malhas de Temperatura

Para todos os controladores foi realizada uma avaliação de desempenho. Para ilustrar os resultados obtidos apresenta-se na Tabela 4 os índices obtidos com a malha do preaquecimento superior. Na avaliação dessa malha, o índice MPA refere-

se ao esforço de controle da válvula controlada. O índice UPA refere-se à capacidade da variável controlada acompanhar o *setpoint* e o índice EPA refere-se à mesma condição, porém ao longo do tempo. A nota GPI é uma média dos três índices citados. As notas médias calculadas referem-se a cinco condições operacionais distintas: controlador médio, para placas no preaquecimento enforçadas a temperatura superior e inferior a 200°C (Janelas 1, 2 e 3); controlador *hot*, para predominância de placas no preaquecimento enforçadas a temperatura superior a 200°C (janela 4); e controlador *cold*, com temperatura inferior a 200°C (janela 5). Apenas na janela 3 o sinal de *setpoint* foi gerado pelo sistema de nível 2 (FCC), nas demais o *setpoint* foi gerado manualmente. Comparando o GPI observa-se uma melhoria no desempenho das malhas utilizando-se os controladores novos projetados. Por exemplo, nas janelas 1 e 2, obteve-se uma melhoria de 14,2%; nas janelas 4 e 2, 0,3% e nas janelas 5 e 2, 22,7%.

Foi possível aumentar de duas a três vezes a velocidade de resposta das malhas de temperatura das zonas de preaquecimento, aquecimento e de encharque em relação aos controladores originais, aumentando-se o ganho proporcional e reduzindo-se os valores de tempo derivativo. Somente para a malha de temperatura das zonas de encharque, o ganho proporcional foi reduzido. Em relação ao tempo integral, pode-se afirmar que as melhorias foram devidas ao aumento deste parâmetro na zona de preaquecimento e diminuição na zonas de aquecimento e encharque. Os resultados obtidos a partir do avaliador de desempenho para as malhas de temperatura mostraram-se coerentes com a inspeção visual nos testes realizados¹.

Pôde-se observar que os desvios entre a variável controlada e o *setpoint* diminuíram significativamente. Com isto, outros resultados podem ser citados como a melhoria da qualidade da placa aquecida, a redução do índice de carepa do forno e a redução do nível de manutenção das válvulas controladas.

Finalmente, pode-se destacar que as ações de melhoria da sintonia das malhas e das novas estratégias de controle implementadas são coerentes com os resultados obtidos quanto à economia de combustível no forno.

Tabela 4. Avaliação de desempenho da malha TIC411.

Janela de Tempo	MPA	EPA	UPA	GPI
Janela 1 - 42500 a 44500 s Degrau – Controlador Proposto Médio - Condição Mista	92,7	76,9	55	74,9
Janela 2 - 45000 a 47500 s. Degrau – Controlador Antigo Condição Mista	92,2	61,1	28,7	60,7
Janela 3 - 47600 a 56000 s FCC – Controlador Proposto Médio – Condição Mista	86,6	74,1	55,9	72,2
Janela 4 - 57000 a 59000 s Degrau – Controlador Proposto Hot (temp. placas > 200°C)	87	64,6	31,3	61
Janela 5 - 59000 até 61200 s Degrau – Controlador Proposto Cold (temp. placas < 200°C)	88,7	87,5	74	83,4

4.3 Desempenho do forno

A Tabela 5 mostra que houve uma redução no consumo de combustível em todos os fornos, comparando-se a média de 2004 com a de 2003. A redução percentual de combustível dos Fornos 3, 4 e 5 foi de 4,04%, 7,02% e 3,28%, respectivamente. Como houve redução em todos os fornos, parte do ganho do Forno 4 deve ser atribuído ao aumento da tonelagem efetiva e às melhorias dos procedimentos operacionais. Como os Fornos 4 e 5 são semelhantes, a parcela

atribuída à melhoria no Forno 5 (3,28%) foi subtraída do valor de 7,02% do Forno 4. Sendo assim, a melhoria na redução do consumo devido aos trabalhos realizados no controle dinâmico do Forno 4 foi de 3,74%. Transformando-se essa redução em calorias e, considerando uma produção média desse Forno de 107.000 t/mês, equivale a uma economia média mensal em torno de 301 mil litros de óleo. Aplicando-se a mesma metodologia nos Fornos 3 e 5 espera-se obter uma economia similar.

Tabela 5. Dados do consumo de combustíveis dos fornos

Forno	2003	2004
3	444,4	426,3
4	444,4	413,2
5	395,9	382,9

5 CONCLUSÕES

Uma redução significativa no consumo de combustíveis pôde ser obtida, seguindo a metodologia de avaliação de desempenho, identificação de comportamento dinâmico das malhas, sintonia dos controladores e aplicação de técnicas de controle avançado. Além destes, deve-se ressaltar que com controladores bem sintonizados e utilizando-se de novas técnicas de controle avançado foi possível aumentar a velocidade de resposta das malhas, minimizar as perturbações e a diminuir o esforço de controle das válvulas controladoras. Tornou-se ainda possível operar o forno em condições diversificadas da planta, sem a necessidade de mudança de operação para o modo manual. Como resultado, observa-se uma menor variabilidade na variável controlada e manipulada, o que implica em maior disponibilidade dos controles em modo automático. Finalmente, a economia média de combustível obtida (de 3,7%) é com certeza expressiva, sobretudo considerando-se que o investimento é relativamente baixo.

Para se manter estes resultados é imprescindível estabelecer uma auditoria periódica destas malhas, considerando-se as variações observadas nos parâmetros dos modelos estimados na fase de modelagem do processo.

Recomenda-se o projeto dos desacopladores nas zonas do forno, pois sua implementação minimizará os efeitos do grande atraso puro de tempo e a influência das zonas vizinhas na temperatura da zona controlada, principalmente na zona de aquecimento.

REFERÊNCIAS

- 1 TEIXEIRA, M. H. Modelagem e Controle do Forno de Reaquecimento de Placas da Linha de Tiras a Quente da Usiminas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, 2005.
- 2 DOEBELIN, E. O. Measurement Systems: Application and Design, 2nd Edition, Ed. McGraw-Hill International, 1990.
- 3 JOTA, F. G. Técnicas de Controle de Processos Industriais. Notas de aula. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.
- 4 SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F; MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 1989.