



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

CONTROLE DE TEMPERATURA DE SECADORES DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS ALIMENTADOS COM GÁS NATURAL

Júlio Elias Normey-Rico¹, Jessé Felipe Müller², Vilmar Menegon Bristol³

^{1,2} Departamento de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina, Trindade,
Cx. Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis – SC. ¹julio@das.ufsc.br, ²jesse@das.ufsc.br

³ Eliane Revestimentos Cerâmicos. Rua Nelo Pesanha, 1100, São Luiz,
CEP 88003-051, Criciúma – SC, ³vilmar@elianet.com.br

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo do sistema de controle de temperatura de um secador de peças cerâmicas alimentado por gás natural. A análise do sistema permite entender melhor o funcionamento do secador e propor soluções de controle que visam principalmente a melhora da qualidade do produto e a otimização do consumo de gás nos queimadores do secador. O artigo propõe três soluções de controle: um novo ajuste para os parâmetros do PI analógico instalado no processo, um algoritmo PID de dois graus de liberdade e um controlador preditivo. OS algoritmos são comparados em simulação mostrando as vantagens de se utilizar técnicas mais avançadas de controle. O trabalho também apresenta resultados experimentais com o novo ajuste do PI proposto.

Palavras-Chave: gás natural; PID; GPC; secadores

Abstract – This paper presents the analysis and design of a temperature control in an industrial dryer of a ceramic industry. The study is oriented to two principal points: to maintain the closed loop temperature conditions in order to have high quality material and to minimize the gas consumption. The paper proposes three solutions for the temperature control system. The first one gives a new set of tuning parameters for the analog PI installed in the real process. The second solution is a two-degree-of-freedom PID tuned in order to obtain a good compromise between the disturbance rejection and set point responses. Finally a predictive controller is proposed which uses also the control effort (gas consumption) as a tuning parameter. The three solutions are compared using simulation tests showing the advantages of the most sophisticated control laws. The paper also presents some experimental results with the proposed PI controller.

Keywords: gas, PID, GPC, dryers

1. Introdução

O gás natural é uma importante fonte de energia em processos industriais, sendo que sua utilização vem crescendo nos últimos anos (Peres e Pereira, 2002). Em particular, no parque industrial catarinense são várias as empresas que, recentemente, vem adotando o gás natural como combustível em várias partes do processo. O sucesso da utilização do gás natural nestas empresas depende da adequação dos sistemas de controle instalados, já que estes são os principais responsáveis pelo uso racional da energia.

No caso do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, os fornos e secadores são os equipamentos que consomem maior quantidade de gás natural e ao mesmo tempo os que determinam a qualidade do produto final. A secagem, que é o objeto de estudo deste trabalho, é executada após a prensagem das peças, e nela retira-se o excesso de umidade das mesmas de forma tal a uniformizá-las antes da entrada ao forno. Esta secagem, feita normalmente por secadores, onde se circula ar quente entre as peças a uma determinada temperatura e velocidade, é uma das principais responsáveis pelas dimensões finais do produto. Isto ocorre devido a contração do volume, ocasionado pela remoção de água (Bristot, 1996). A secagem também influencia na variação da resistência mecânica a seco das peças e na presença de defeitos estéticos que aparecem quando a temperatura não é mantida no valor estabelecido. Assim, um correto funcionamento do secador assegura peças mais uniformes, menor desperdício e maior qualidade, e ao mesmo tempo melhor aproveitamento do gás natural utilizado como combustível. Para conseguir este objetivo, deve-se controlar a temperatura no interior do secador em valores pré-determinados pelo ceramista, independentemente das variações de carga e das eventuais paradas da linha de produção. Por outro lado, a manutenção de uma estrutura de controle simples é importante para minimizar o investimento e permitir uma rápida adaptação dos operadores.

Assim, neste trabalho, é estudado o sistema de controle de temperatura utilizando controladores do tipo PI, PID e controle preditivo baseado em modelo. Como primeiro objetivo, propõe-se a otimização do ajuste dos parâmetros do controlador PI instalado no processo. Como segundo objetivo apontam-se soluções mais avançadas que, mediante a modificação do hardware instalado no processo, permitam melhorar o comportamento do sistema visando respostas adequadas e minimizando o consumo de gás natural. O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 apresenta-se o processo e a modelagem realizada. Na seção 3 o procedimento de ajuste dos controladores e na seção 4 os resultados de simulação e experimentais. O trabalho é finalizado com as conclusões.

2. O Processo Cerâmico e o Processo de Secagem

2.1. O Processo Cerâmico

O processo de fabricação de produtos cerâmicos “tradicionais”, entre os quais estão incluídos os pavimentos e revestimentos cerâmicos, se desenvolve normalmente em fases sucessivas, começando com a seleção das matérias-primas, que devem formar parte da composição de partida (argilas, caulins, feldspatos, quartzos e carbonatos). Uma vez realizada a primeira mistura dos distintos componentes da massa cerâmica, esta será submetida a um processo de moagem, que pode ser “via seca” ou “via úmida”. No caso estudado, a moagem é por via úmida e posterior secagem da suspensão resultante por atomização, visando eliminar parte da água até que se alcance o conteúdo de umidade necessário para cada processo.

Depois da etapa de moagem e secagem, passa-se ao procedimento de conformação das peças por prensagem a semi-seco (5 - 8% de umidade), mediante o uso de prensas hidráulicas. A peça cerâmica uma vez conformada, será submetida a uma etapa de secagem, com o fim de eliminar a água contida, procurando que não sejam produzidos defeitos. Nos produtos não esmaltados, logo após a etapa de secagem, realiza-se a queima. Nos produtos esmaltados fabricados por monoqueima, a etapa seguinte a secagem é a de esmaltação, que consiste na aplicação de uma ou várias camadas de vidrado que cobrirá a superfície da peça.

Após a etapa de esmaltação, realiza-se a queima do esmalte no processo de biqueima, ou a queima do esmalte e do suporte conjuntamente nos processos de monoqueima. Logo em seguida, acontece a classificação dos revestimentos cerâmicos em máquinas classificadoras automáticas que separam as peças defeituosas.

2.3. Secadores

São equipamentos nos quais, por meio de calor (normalmente), é efetuada a secagem de materiais. Podem ser classificados de acordo com o tipo de alimentação e o sistema de aquecimento (Bristot, 1996). O secador estudado, localizado na Unidade V da Eliane Revestimentos Cerâmicos em Criciúma – SC, pode ser considerado um secador contínuo vertical por convecção, onde as peças são transportadas através de cestones (espécie de caixas com planos a rolos onde são carregados e descarregados os revestimentos cerâmicos). A carga e descarga do material são contínuas e automáticas e a parada e o acionamento dos cestones é determinada através de um sensor que envia um sinal para o sistema motriz para acertar o posicionamento dos mesmos.

Nestes secadores, um fluxo de ar quente circula em contra corrente ao fluxo do material a secar. Devido a este princípio as peças cerâmicas ao entrarem no secador, são cobertas por ar moderadamente quente e estão bastante úmidas; durante o processo, as zonas são cada vez mais quentes e menos úmidas. O ar quente proveniente do gerador de calor mistura-se com o ar de recirculação e juntos são injetados na câmara central do secador. A seguir este ar quente passa através de aberturas denominadas de serrandas, que podem ser reguladas manualmente na parte externa do

secador, e entra em contato com os revestimentos cerâmicos. Na figura 1 mostram-se o sistema de circulação e recirculação de ar quente, a exaustão do ar saturado e a movimentação de peças cerâmicas dentro do secador vertical.

O sistema de recirculação de ar é composto de um ventilador (sem controle de velocidade) que puxa o ar que está no interior do secador e o injeta no queimador. Por sua vez o sistema de controle do queimador é constituído de um servo motor, uma válvula de ar e uma válvula de gás (Sacmi, 1989). A temperatura no interior do secador é medida com um termopar.

O sistema de controle de temperatura instalado no secador está composto por dois controladores do tipo PI (proporcional e integral) de forma tal que quando a linha de produção está em funcionamento, um dos controladores é acionado. Quando a linha de produção pára, o outro por sua vez entra em funcionamento. Estes controladores enviam um sinal para o servo motor, que através de braços mecânicos regulados manualmente ligados às válvulas, são responsáveis pela relação ar x gás do sistema.

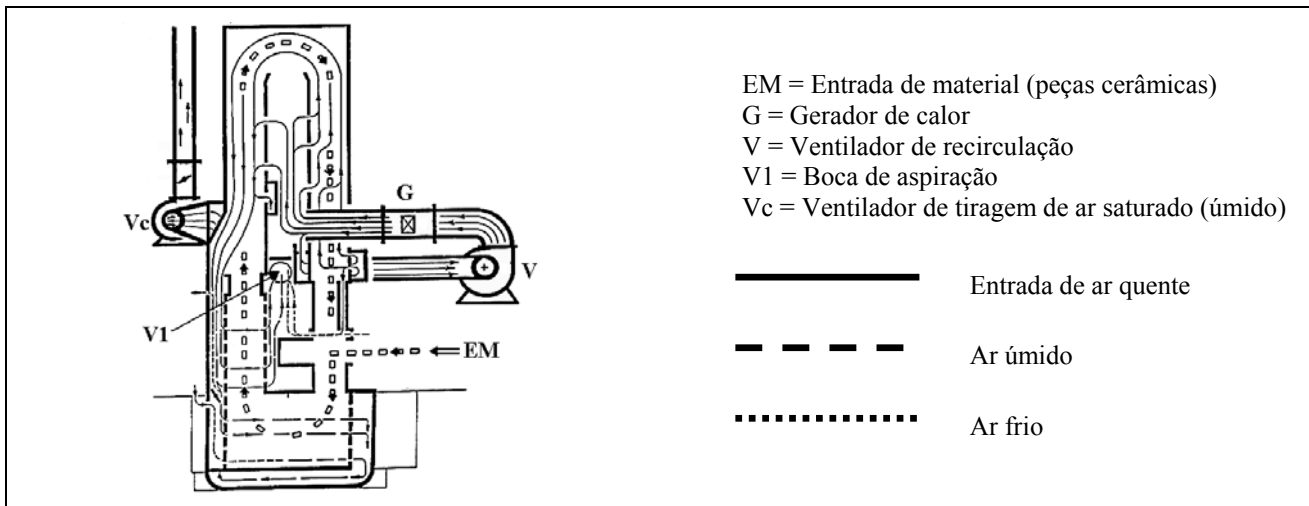


Figura 1. Circulação de ar e movimentação de peças no secador

2.3. Modelagem

Dadas as dificuldades para realizar uma modelagem teórica do secador, optou-se por realizar diversos experimentos de identificação do tipo “step-test” em várias condições de trabalho. Os testes foram realizados no secador vertical número 1 da Eliane Revestimentos Cerâmicos – Unidade V. Todos os experimentos foram executados em malha fechada, dado que o secador não pode ser parado nem colocado para funcionar fora da faixa de temperatura de operação normal sem prejuízo de produção. A partir destes experimentos, foi realizado o levantamento dos modelos matemáticos do secador em três condições de trabalho:

- 1) Caso T = transição da temperatura de aproximadamente 100°C para aproximadamente 160°C e transição da temperatura de aproximadamente 160°C para aproximadamente 100°C ;
- 2) Caso A = variações da temperatura de aproximadamente $\pm 10^\circ\text{C}$ nas vizinhanças do ponto de operação de 160°C;
- 3) Caso B = variações da temperatura de aproximadamente $\pm 10^\circ\text{C}$ nas vizinhanças do ponto de operação de 100°C;

Dois modelos foram utilizados para representar a dinâmica do secador: um modelo de primeira ordem com atraso $Pp(s)$ e um modelo de segunda ordem com atraso $Ps(s)$. Os modelos nominais obtidos para cada caso são apresentados a seguir:

$$\text{Caso T} \quad Pp(s)_T = \frac{0,121}{(71,42s + 1)} e^{-15,33s} \quad Ps(s)_T = \frac{0,121}{(72,22s + 1)(8,44s + 1)} e^{-11,99s} \quad (1)$$

$$\text{Caso A} \quad Pp(s)_A = \frac{0,4}{(66,6s + 1)} e^{-15s} \quad Ps(s)_A = \frac{0,4}{(72,43s + 1)(18,63s + 1)} e^{-11,6s} \quad (2)$$

$$\text{Caso B} \quad Pp(s)_B = \frac{0,55}{(109,3s + 1)} e^{-19,25s} \quad Ps(s)_B = \frac{0,55}{(72,68s + 1)(37,42s + 1)} e^{-10,5s} \quad (3)$$

3. O Projeto dos Controladores

Como já foi comentado, o primeiro objetivo deste trabalho é o de estudar alguns métodos para ajustar os ganhos do controlador PI que hoje faz parte do processo de secagem de peças cerâmicas, de forma a melhorar o comportamento do sistema sem realizar investimentos nas áreas de hardware e software, visto que, a especificação para

os controladores PI, que deve garantir o seguimento as referências de 160 e 100 °C com erros menores que 1% e a transição entre os dois pontos de operação com uma dinâmica rápida e sem oscilações, não esta sendo atendida.

O segundo objetivo deste trabalho é o de propor um novo tipo de controlador, visando obter um melhor desempenho em relação ao já existente. Serão utilizadas técnicas de projeto de controladores PID assim como uma proposta de projeto de controle moderno, especificamente o Controle Preditivo Generalizado baseado no Preditor Smith (SPGPC), que tem se mostrado muito eficiente para o controle de processos com características similares ao aqui estudado (Normey-Rico e Camacho, 1999).

3.1. Ajuste Nominal dos Controladores PI e PID

Para a realização deste trabalho, foram estudados alguns métodos para o ajuste de controladores PI e PID bastante utilizados em ambientes industriais (Bristol, 2002). Para verificar se estas propostas realmente estão de acordo com as especificações de desempenho exigidas no processo de secagem de peças cerâmicas, é necessário que as mesmas sejam avaliadas através de simulações antes de passar à fase experimental. A comparação entre os controladores projetados considera o seguimento de referências, a rejeição de perturbações e o esforço de controle.

Como resultado deste estudo, foi escolhido o método de ajuste ITAE 2DOF, que apresentou as melhores características de resposta entre os métodos estudados, tanto para o caso do PI como do PID. Este método de ajuste foi derivado do conhecido método que minimiza o ITAE (integral do erro absoluto no tempo) (Astrom e Hagglund, 1995) para as perturbações de carga, com a inclusão de um filtro passa baixas no sinal de referência. Deve-se observar que os controladores foram implementados com a estrutura acadêmica. Com a adição do filtro, este controlador torna-se um controlador de dois graus de liberdade (2DOF), que é utilizado quando se deseja ajustar de forma independente a resposta de controle para mudanças de referência e perturbações. A função de transferência do filtro utilizado é:

$$F(s) = \frac{1}{25s + 1} \quad (4)$$

3.2. Ajuste Robusto do PI e PID

Um fator muito importante a considerar na hora do projeto é a robustez das soluções obtidas, dado que o controlador deve funcionar corretamente com o processo real e não apenas com o modelo calculado. Para considerar a robustez no projeto, supõe-se que a planta pode ser representada por uma família de funções de transferência. No caso particular do secador, considera-se que cada função de transferência (F.T.) identificada $G_i(s)$, é um elemento da família e que a F.T. escolhida para o ajuste dos controladores é o modelo nominal $G(s)$. Desta forma pode-se escrever que:

$$G_i(s) = G(s) + DG(s) = G(s)(1 + dG(s)) \quad (5)$$

o que permite definir um erro de modelagem entre o processo real e o modelo que é, na sua forma multiplicativa, representado por $dG(s)$. Utilizando um diagrama de Nyquist do sistema controlado pelo PI ou PID (que denomina-se aqui $C(s)$) é possível definir um índice de robustez para o controlador dado por:

$$I_r = \left| \frac{1 + G(jw).C(jw)}{G(jw).C(jw)} \right| \quad w \in [0, \infty) \quad (6)$$

de forma tal que para que o controlador mantenha a robustez de malha fechada para quaisquer planta da família, é necessário que se verifique:

$$I_r > \max |dG(jw)| \quad w \in [0, \infty) \quad (7)$$

Em geral, quando se deseja que o sistema de controle mantenha uma resposta pouco oscilatória e não apenas estável, define-se uma distância mínima entre o índice de robustez e o erro de modelagem:

$$I_r > \max |dG(jw)| + e0 \quad w \in [0, \infty) \quad (8)$$

Assim, denominando de erro máximo à função da frequência obtida como:

$$erro_max = \max |dG(jw)| + e0 \quad w \in [0, \infty) \quad (9)$$

Para um dado $e0$, é possível analisar a robustez do controlador e ajusta-lo adequadamente utilizando gráficos no domínio frequencial com os valores de I_r e $erro_max$. Neste caso, o $e0$ foi escolhido igual a 0,5.

Observou-se que os controladores previamente ajustados pelo método ITAE não atenderiam as especificações de robustez, e em algumas situações levariam o sistema à instabilidade. A fim de obter uma solução robusta do problema, os controladores foram reajustados. O teste de robustez para os novos ajustes e os novos valores dos parâmetros dos controladores são apresentadas na figura 2 para os três casos (T, A e B).

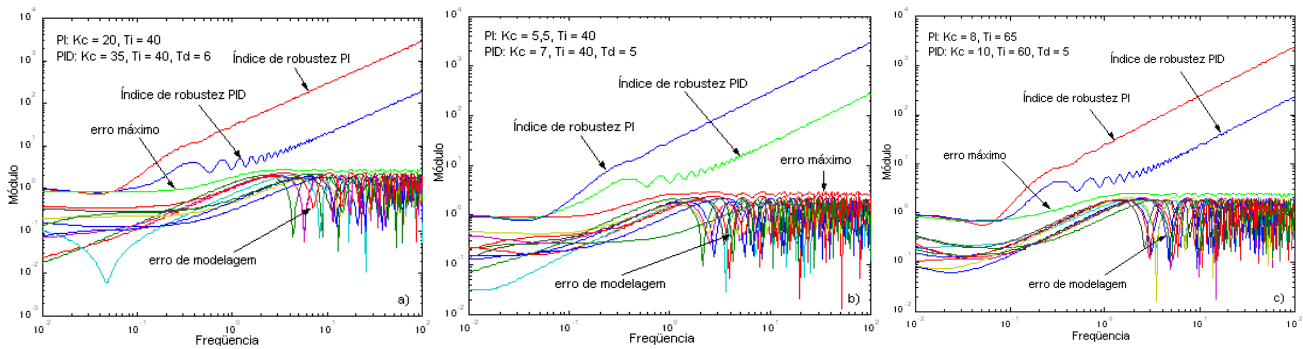


Figura 2. Robustez dos controladores PI e PID para o processo após o ajuste: a) $P(s)_T$; b) $P(s)_A$; c) $P(s)_B$.

3.3. Ajuste do Controlador Preditivo Generalizado Baseado no Preditor de Smith (SPGPC)

O (SPGPC) se baseia nas idéias de otimização quadrática do algoritmo GPC proposto em (Clarke et al., 1987) e nas características de predição do SP proposto por (Smith, 1959). Os resultados relacionados com a proposta do SPGPC para o caso SISO podem ser encontradas em (Normey-Rico, 1998), sendo que em (Normey-Rico e Camacho, 1999) apresenta-se, ainda para o caso SISO, um estudo da robustez do controlador e do ajuste de parâmetros, inclusive comparando o SPGPC com outros controladores preditivos. Nestes trabalhos, mostra-se como o SPGPC tem um procedimento de ajuste bastante simples para ser utilizado em aplicações reais de processos com atraso onde existem grandes erros de modelagem, como é o caso do processo aqui analisado.

O ajuste do SPGPC foi realizado para o modelo nominal do caso A do secador. Utilizando um horizonte de controle $N = 10$ e um filtro de robustez de índice $\beta = 0,7$ (Bristol, 2002), foram realizados diversos experimentos a fim de encontrar o melhor valor da ponderação da ação de controle λ , tanto para o seguimento de referência como para a rejeição de perturbações. Na prática, deve ser utilizado um valor de λ que apresente um bom compromisso entre a resposta dinâmica e o consumo, visto que para valores menores de λ , a resposta dinâmica melhora, exigindo desta forma maior esforço de controle, que por sua vez aumenta o consumo. O valor utilizado para λ foi de 0,1.

4. Resultados Obtidos

4.1. Resultados de Simulação

A seguir são apresentados graficamente somente os melhores resultados dos métodos estudados, no que se refere ao comportamento em malha fechada do sistema de secagem de peças cerâmicas para seguimento de referência, rejeição de perturbações e o esforço de controle para o caso A.

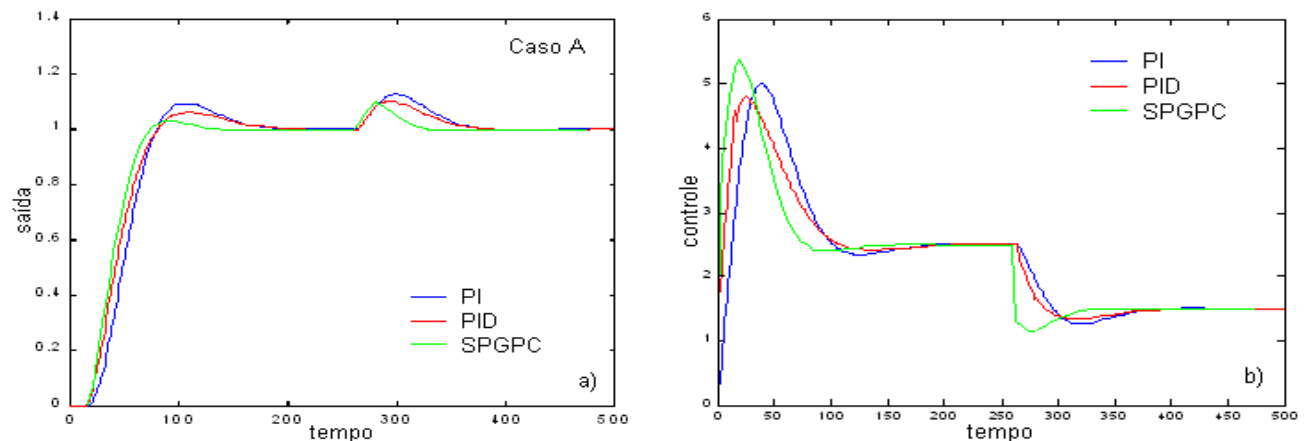


Figura 3. Resposta de simulação para o caso A da: a) saída; b) controle

Pode-se concluir, a partir da figura 3, que apesar de o controlador PI apresentar uma boa resposta dinâmica, esta pode ser melhorada com a utilização de um PID ou em um nível de controle mais avançado, com a aplicação do controlador SPGPC.

4.4. Resultados Experimentais

Na figura 4 abaixo, são apresentados os resultados experimentais para os casos T e A com os controladores PI analógicos antes e depois dos ajustes propostos. Estes ajustes utilizaram como ponto de partida os valores de T_i e K_c robustos, calculados pelo método ITAE 2DOF. Como em toda aplicação real, foi necessário realizar um reajuste de T_i e K_c de forma empírica.

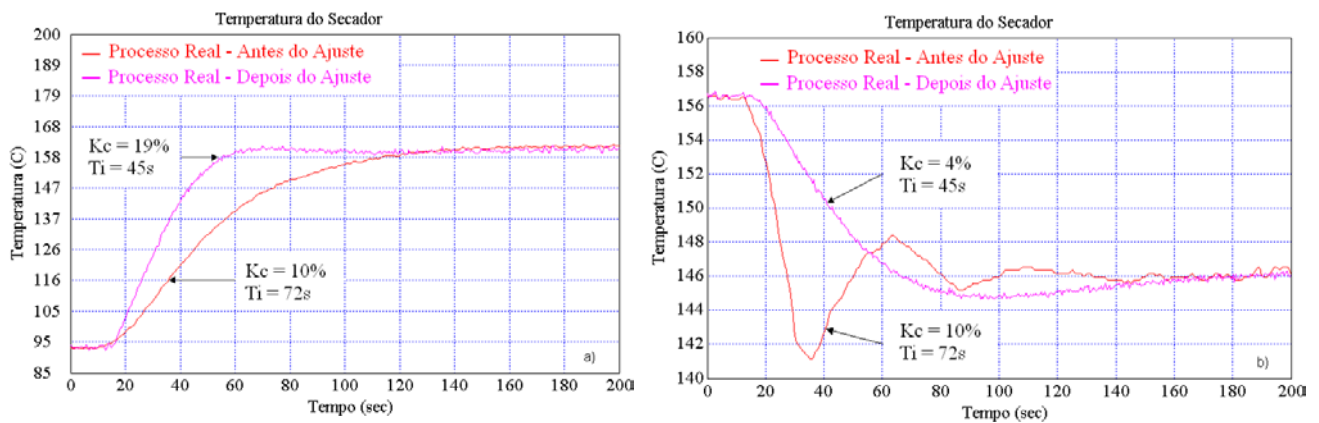


Figura 4. Resultados experimentais para o: a) Caso T; b) Caso A

Observa-se nestes gráficos que após o ajuste dos parâmetros do controlador PI, as respostas ao seguimento de referência e a perturbações foram melhores do que antes do ajuste. Com esse melhor desempenho, obteve-se no processo uma melhora significativa em termos de qualidade e produtividade.

5. Conclusões e Perspectivas

No caso do ajuste do controlador PI analógico do secador, foram obtidos bons resultados. Após a mudança nos ajustes dos controladores, foi realizado um acompanhamento do funcionamento do secador durante alguns meses. Neste processo, estimaram-se algumas variáveis do tipo econômico-industrial que avaliam a importância das modificações introduzidas. Estas foram: (1) aumento de 2% na quantidade de produto produzido sem falhas devido a diminuição dos defeitos nas peças oriundas de uma má secagem; (2) aumento na produção de 1%, isto porque, quando acontece a variação de temperatura nas peças cerâmicas, as mesmas possuem uma conseqüente variação na resistência mecânica, ocasionando a quebra das mesmas; (3) uma economia de gás natural de aproximadamente 1%. Assim, os resultados deste trabalho podem ser considerados como muito positivos, já que tem contribuído, de forma significativa, para melhorar o comportamento do sistema de controle do secador, e como conseqüência, do processo cerâmico.

Como trabalhos futuros e com o objetivo de melhorar o comportamento do sistema de controle de secagem, se pretende substituir o controlador analógico instalado por um controlador digital SPGPC já que os resultados de simulação foram bastante satisfatórios tanto na simplicidade do ajuste como no desempenho e robustez, que se deve fundamentalmente à possibilidade de compensar o atraso de transporte do sistema.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Agência Nacional do Petróleo - ANP através do programa PRH-ACIPG 34, e do CNPq-CTPetro projeto 460214/01-2 e a empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos.

7. Referências

- ASTROM, K., HAGGLUNG, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. *Instrument Society of America*, 1995.
- BRISTOT, V.M. Máquinas e Equipamentos para Cerâmica. 1.ed. Criciúma, Santa Catarina : Editora, 1996
- BRISTOT, V.M. Controle de temperatura de secadores alimentados por gás natural. *Dissertação de mestrado*, PG-EEL, UFSC, 2002.
- CLARKE, D., MOTHADI, C., TUFFS, P. Generalized Predictive Control. Part I The Basic Algorithm and Part II Extensions and Interpretations, *Automatica* 23(2): 137–160, 1987.
- NORMEY-RICO, J. E., CAMACHO, E. F., GOMEZ-ORTEGA, Juan. Robustez em Controladores Preditivos Generalizados. In: *XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA* (Set., 1998 : Uberlândia, Minas Gerais). Anais. Minas Gerais, 1998. p.157-162, 1998.
- NORMEY-RICO, J. E., CAMACHO, E. Robustness Effects of a Prefilter in Smith Predictor Based Generalised Predictive Controller, *IEE Proceedings, Control Theory and Applications* 146 (2) : 179-185, 1999.
- PERES, A., PEREIRA, A. Gas and power integration in the Southern Cone. *Strategies for World Energy. 17th World Petroleum Congress*, Rio de Janeiro, Brasil, setembro, 2002.
- SACMI. Catalogo : Essicatioio Verticale Automatico EVA 140. Ímola – Italy, 1996.
- SMITH, O. J. A controller to evercome dead time. *ISA Journal*, vol. 6, n.2, p. 28-33, 1959.