

DETECÇÃO DE FALHAS INCIPIENTES DE SENSOR EM UM PROCESSO TÉRMICO COM CONTROLE PREDITIVO TIPO DYNAMIC MATRIX CONTROL

JOSÉ ROBERTO COLOMBO JUNIOR*, VICENTE CARVALHO LIMA FILHO*, ROBERTO KAWAKAMI HARROP GALVÃO*, EDVALDO ASSUNÇÃO†

*ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Divisão de Engenharia Eletrônica
Departamento de Sistemas e Controle

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12228-900, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil

†UNESP - Universidade Estadual Paulista

Departamento de Engenharia Elétrica, Lab. de Pesquisa em Controle
Av. José Carlos Rossi, 1370, 15835-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

Emails: colombojrj@gmail.com, vicente.carvalho@aluno.ita.com, kawakami@ita.br, edvaldo@dee.feis.unesp.br

Abstract— This paper is concerned with the detection of incipient faults in a temperature sensor on the basis of data acquired during closed-loop operation. More specifically, it is assumed that a *Dynamic Matrix Control* (DMC) predictive controller has already been implemented by using the open-loop step response of the plant. The proposed fault detection approach employs an anomaly index calculated from the difference between the sensor readings and the predictions of the internal DMC model. An experimental investigation was carried out by using a small-scale laboratory air heating system. In this case, faults may consist of alterations in the dynamic response of the sensor, resulting from the progressive deposition of contaminants on its surface. In the experiments, such faults were emulated in software by introducing a parasite dynamics block after the actual sensor output. The analysis of the results revealed that the fault can be detected at an early stage, when closed-loop operation is still similar to the nominal operating conditions.

Keywords— predictive control, thermal process, prediction error, fault detection, sensor fault.

Resumo— Este trabalho trata da detecção de falhas incipientes em um sensor de temperatura empregando dados adquiridos durante operação em malha fechada. Mais especificamente, considera-se que seja usado um controlador preditivo do tipo *Dynamic Matrix Control* (DMC), previamente implementado com base na resposta a degrau da planta em malha aberta. A abordagem proposta para detecção de falhas emprega um índice de anomalia calculado a partir da diferença entre as leituras do sensor e as previsões do modelo interno do controlador DMC. Uma investigação experimental foi conduzida com o uso de um sistema de aquecimento de ar em escala de laboratório. Nesse caso, falhas poderiam consistir em alterações da dinâmica de resposta do sensor, decorrentes da progressiva deposição de contaminantes em sua superfície. Nos experimentos, tais falhas foram emuladas em *software* por meio da introdução de uma dinâmica parasita após a saída real do sensor. Como resultado, observou-se que a falha pode ser detectada em um estágio inicial, quando o desempenho do sistema em malha fechada ainda se mostra pouco alterado com respeito às condições nominais de operação.

Palavras-chave— controle preditivo, processo térmico, erro de predição, detecção de falha, falha em sensor.

1 Introdução

Falhas em sistemas de controle podem ser entendidas como alterações indesejadas em sensores, atuadores ou componentes internos da própria planta. A pronta detecção de falhas em estágio incipiente é de valia para permitir o planejamento de ações de manutenção com antecedência apropriada, impedindo assim que a evolução da falha acabe por comprometer a operação do sistema (Vachtsevanos et al., 2006). Idealmente, é desejável que a detecção de falhas incipientes possa ser realizada por meio da monitoração do sistema em malha fechada, sem a necessidade de interrupção da tarefa de controle para realização de testes específicos.

Neste trabalho, considera-se o problema de detectar uma falha incipiente no sensor de temperatura de um sistema de aquecimento de ar. Tal falha poderia ser oriunda, por exemplo, da deposi-

ção de contaminantes na superfície do sensor, com consequente alteração em sua condutividade térmica (Delfino et al., 2010). O sistema será monitorado em malha fechada, considerando a utilização de uma lei de controle preditivo do tipo *Dynamic Matrix Control* (DMC).

O Controle Preditivo Baseado em Modelo (*Model-based Predictive Control*, MPC), ou simplesmente Controle Preditivo, surgiu no final dos anos 70, com aplicações na indústria química e petrolífera, tendo posteriormente seu uso disseminado em várias outras áreas (Camacho and Bordons, 2004). O DMC foi uma das primeiras formulações de MPC a serem desenvolvidas e ainda hoje é utilizado em diversas aplicações (Lan et al., 2011), (Eshaghi et al., 2012) e (Chen et al., 2009). Nessa abordagem, o controle é obtido como solução de um problema de otimização com custo quadrático, empregando um modelo baseado na resposta a degrau da planta em malha

aberta.

O método de detecção de falhas aqui proposto baseia-se em um índice de anomalia calculado com base no erro entre as leituras do sensor e as previsões realizadas pelo modelo interno do próprio controlador DMC. Para fins de avaliação experimental, empregou-se um processo térmico de laboratório, com falhas emuladas por meio da introdução de uma dinâmica parasita na saída do sensor.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na sub-seção 1.1, apresenta-se a notação adotada no restante do texto. Na Seção 2, resume-se a formulação DMC empregada. Na Seção 3, apresenta-se o índice de anomalia proposto para detecção de falhas do sensor. Nas Seções 4 e 5, descrevem-se o experimento realizado e os resultados obtidos. Comentários finais são apresentados na Seção 6.

1.1 Notação

- k : Instante atual (índice de tempo discreto);
- $u(k)$, $y(k)$: Controle e saída da planta no instante k ;
- $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$: Incremento de controle;
- $\Delta \hat{u}(k+i|k)$: Valor futuro do incremento de controle no instante $k+i$, dentro de um horizonte de predição de N passos iniciado no instante k ;
- $\hat{y}(k+i|k)$: Valor predito da saída no instante $k+i$ com base nas informações disponíveis até o instante k , supondo a aplicação da sequência de incrementos de controle $\Delta \hat{u}(k+j|k)$, ($j = 0, 1, \dots, i-1$);
- $y_{ref}(k+i)$: Sinal de referência;
- $\Delta \hat{u}^*(k+i|k)$: Valor ótimo de $\Delta \hat{u}(k+i|k)$;
- $g(n)$: Resposta da planta em malha aberta no n -ésimo instante de amostragem após a aplicação de um degrau de entrada unitário;
- $f(k+i|k)$: Resposta livre da planta no instante $k+i$, considerando que o controle seja mantido constante após o instante k ; e
- I : Matriz identidade com dimensões apropriadas.

2 Formulação DMC empregada

Na formulação DMC, o controle a ser aplicado à planta no k -ésimo instante de amostragem é obtido por meio da minimização de uma função de custo da forma

$$J = \sum_{i=1}^N [\hat{y}(k+i|k) - y_{ref}(k+i)]^2 + \rho [\Delta \hat{u}(k+i-1|k)]^2, \quad (1)$$

sendo o peso $\rho > 0$ um parâmetro de projeto. Alternativamente, o custo J pode ser reescrito como

$$J = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}_{ref})^T (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}_{ref}) + \rho \Delta \hat{\mathbf{u}}^T \Delta \hat{\mathbf{u}}, \quad (2)$$

definindo-se

$$\Delta \hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \Delta \hat{u}(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+N-1|k) \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+N|k) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{y}_{ref} = \begin{bmatrix} y_{ref}(k+1) \\ y_{ref}(k+2) \\ \vdots \\ y_{ref}(k+N) \end{bmatrix}.$$

Como detalhado em (Maciejowski, 2002), a relação entre $\Delta \hat{\mathbf{u}}$ e $\hat{\mathbf{y}}$ pode ser expressa na forma da Equação (3):

$$\hat{y}(k+i|k) = \sum_{n=1}^i g(n) \Delta \hat{u}(k+i-n|k) + f(k+i|k), \quad (3)$$

sendo $g(n)$ as amostras da resposta a degrau da planta e $f(k+i|k)$ a resposta livre da planta, apresentada na Equação (4):

$$f(k+i|k) = y(k) + \sum_{n=1}^{\infty} [g(n+i) - g(n)] \Delta u(k-n). \quad (4)$$

Vale salientar que a equação de predição (3) já leva em conta uma correção de perturbação de saída, suposta constante (Maciejowski, 2002), de modo a conferir ação integral à lei de controle resultante.

Supondo que a planta seja estável, tem-se $g(n+i) - g(n) \simeq 0$ para n suficientemente grande. Desse modo, pode-se truncar a somatória apresentada em (4) após um certo número N_s de parcelas, como mostrado na Equação (5):

$$f(k+i|k) = y(k) + \sum_{n=1}^{N_s} [g(n+i) - g(n)] \Delta u(k-n). \quad (5)$$

A Equação (3) pode ser reescrita em forma compacta, como mostrado na Equação (6):

$$\hat{\mathbf{y}} = G \Delta \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{f}, \quad (6)$$

sendo

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(k+1|k) \\ f(k+2|k) \\ \vdots \\ f(k+N|k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G = \begin{bmatrix} g(1) & 0 & \cdots & 0 \\ g(2) & g(1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(N) & g(N-1) & \cdots & g(1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

A minimização da função de custo (2) sujeita ao vínculo (6) entre \hat{y} e $\Delta\hat{u}$ resulta em

$$\Delta\hat{u}^* = (G^T G + \rho I)^{-1} G^T (\mathbf{y}_{\text{ref}} - \mathbf{f}) \quad (9)$$

Empregando uma estratégia de horizonte retrocedente, apenas o primeiro elemento da sequência de controle ótima é aplicado à planta, isto é, faz-se $u(k) = u(k-1) + \Delta\hat{u}^*(k|k)$. No próximo instante de amostragem, utiliza-se $y(k+1)$ em lugar de $y(k)$ para cálculo da resposta livre, emprega-se novamente a expressão (9) e faz-se $u(k+1) = u(k) + \Delta\hat{u}^*(k+1|k+1)$.

3 Índice de anomalia do sensor

Em geral, espera-se que descasamentos entre o modelo interno empregado pelo controlador e a dinâmica real da planta (incluindo atuador e sensor) acarretem erros entre a leitura do sensor e o valor correspondente predito pelo modelo. No instante $k+1$, o erro de predição um passo à frente pode ser definido como:

$$e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1|k), \quad (10)$$

para $k = 0, 1, \dots, N_{op} - 1$, sendo N_{op} o número de amostras adquiridas durante o período de tempo em que o sistema foi monitorado.

O índice de anomalia I_a proposto consiste na soma dos quadrados dos erros $e(k+1)$, ou seja,

$$I_a = \sum_{k=0}^{N_{op}-1} [y(k+1) - \hat{y}(k+1|k)]^2, \quad (11)$$

sendo $\hat{y}(k+1|k)$ calculado por meio da Equação (3) com $i = 1$.

4 Experimentos realizados

4.1 Processo térmico empregado

A planta utilizada nos experimentos é um processo térmico para uso em laboratório, fabricado pela empresa *Quanser Consulting*. Como pode ser visto na Figura 1, a planta consiste em um tubo de fibra de vidro com seção retangular, contendo três sensores de temperatura (transdutores de platina com tempo de acomodação de 4 s). Em uma das extremidades há uma abertura para a saída do ar, enquanto na outra extremidade tem-se uma resistência de aquecimento em espiral e uma ventoinha. A resistência de aquecimento é alimentada por um circuito interno, com potência máxima de 400 W.

Durante os experimentos, a velocidade da ventoinha foi mantida constante. Para fins de controle, manipulou-se a tensão de comando v_c do circuito de alimentação da resistência de aquecimento, que pode variar entre 0 (desligado) e 5V (potência máxima). Adotou-se como variável de saída y a temperatura medida pelo sensor número dois, como mostrado na Figura 1.

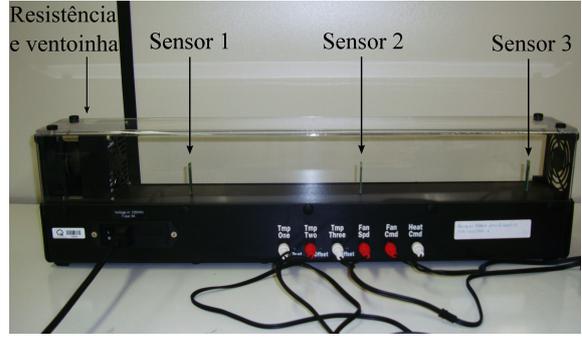


Figura 1: Processo térmico empregado nos experimentos.

A comunicação entre o computador e a planta foi realizada com o uso de um módulo de aquisição de dados Q8-USB (*Quanser*), empregando-se a plataforma computacional *Matlab/Simulink* com o software *QuaRC* (*Quanser*) para controle em tempo real.

4.2 Implementação do controlador DMC

Inicialmente, foi adquirida a resposta da planta (temperatura medida no sensor 2) para um degrau de tensão no comando v_c do circuito de alimentação da resistência de aquecimento. Para verificar a linearidade da resposta, foram aplicados degraus de amplitude $v_c = 2 V$, $v_c = 3 V$ e $v_c = 4 V$. Não se levantou a resposta para $v_c = 5 V$ de modo a evitar um possível dano à resistência causado por um aquecimento em nível máximo durante um período de tempo prolongado. A Figura 2 apresenta as respostas obtidas, após remoção do *offset* de temperatura inicial e normalização pela amplitude do degrau de tensão.

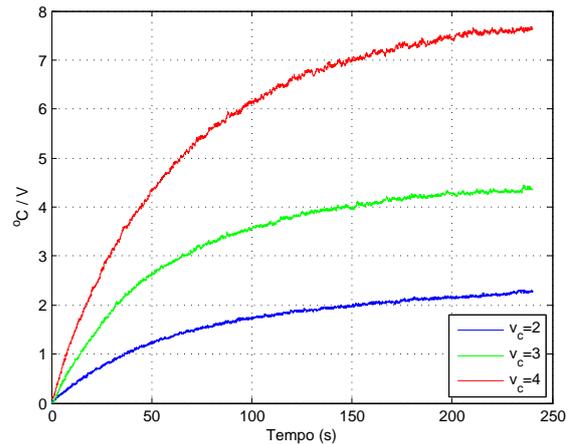


Figura 2: Respostas a degrau da planta em malha aberta normalizadas com respeito à amplitude do degrau de tensão em v_c .

Como se pode observar na Figura 2, há uma separação apreciável entre as respostas normalizadas, o que sugere a presença de não-

linearidade com respeito à entrada de controle v_c . Em uma tentativa de contornar esse problema, normalizaram-se as respostas por v_c^2 , tendo-se obtido as curvas apresentadas na Figura 3. Como se pode observar, o resultado aproximou-se mais da linearidade. Embora o manual não traga informações detalhadas sobre o circuito de alimentação da resistência de aquecimento, pode-se supor que a tensão aplicada à resistência varie linearmente com a entrada de controle v_c . Desse modo, a potência dissipada seria proporcional a v_c^2 , o que explicaria a melhor linearidade obtida na relação entre v_c^2 e a variação de temperatura.

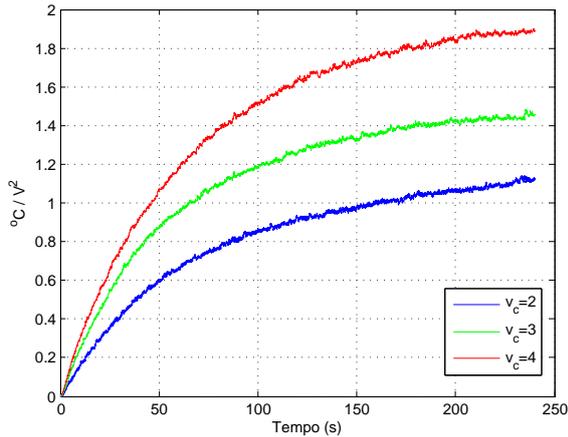


Figura 3: Respostas a degrau da planta em malha aberta normalizadas com respeito a v_c^2 .

Para implementação do controlador DMC, o controle foi então definido como sendo $u = v_c^2$. A resposta a degrau adotada para uso na equação de predição foi aquela obtida com $v_c = 4 V$. Com efeito, como se verá na próxima seção, o controle u variou em torno de $16 V^2$ ao longo da tarefa de controle. É interessante ressaltar que os resultados de detecção de falhas se mostraram apropriados, mesmo com a não linearidade ainda remanescente na relação entre o controle u e a saída y .

O controlador DMC foi implementado com período de amostragem $T = 1 s$, horizonte de predição $N = 40$ e peso $\rho = 1$.

4.3 Introdução de falha no sensor

A falha incipiente considerada consistiu na introdução de uma dinâmica parasita em série com o sensor. Tal dinâmica parasita foi introduzida dentro do ambiente *Matlab/Simulink* empregando uma função de transferência da forma

$$H_F(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (12)$$

sendo τ uma constante de tempo que tenderia a aumentar, na prática, com a deposição de contaminantes na superfície do sensor. O diagrama apresentado na Figura 4 representa a malha de

controle com o bloco adicional associado à falha do sensor. Vale salientar que, dentro do bloco “Controlador”, acrescentou-se uma saturação para limitar o controle u à faixa $[0, 25] V^2$.

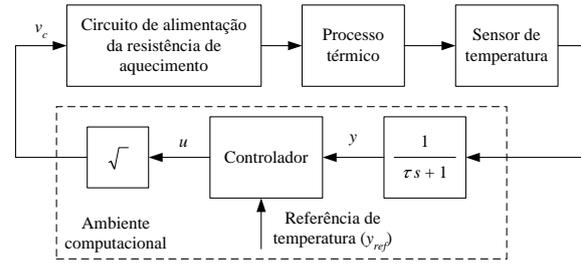


Figura 4: Malha de controle com a alteração da dinâmica do sensor.

Foram realizados ensaios em malha fechada para $\tau = 0, 1, 2, 3, 4$ e $5 s$, o que na prática representaria um aumento progressivo na contaminação do sensor de temperatura. Para cada valor de τ , o ensaio foi repetido cinco vezes, totalizando 30 experimentos. Em todos os casos, a tarefa de controle consistiu no rastreamento de um degrau na referência de $28^\circ C$ para $40^\circ C$.

5 Resultados e Discussão

A Figura 5 apresenta o resultado de um ensaio realizado com $\tau = 0$, isto é, sem a introdução de falha no sensor de temperatura. Neste caso, verificou-se que o sobressinal foi de $0,8^\circ C$ e o tempo de estabelecimento foi de $60 s$ (com critério de 1%).

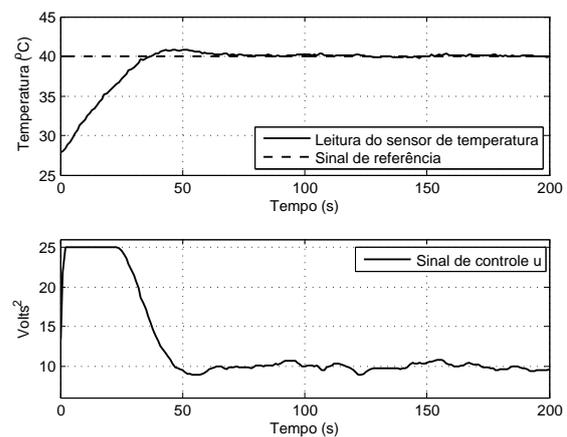


Figura 5: Resposta da planta em malha fechada sem introdução de falha no sensor.

Para ilustrar a perda de desempenho que resultaria se a contaminação do sensor progredisse para níveis elevados, sem que ações de manutenção fossem tomadas, realizou-se um experimento com $\tau = 20 s$. Como se pode observar na Figura 6, a resposta do sistema em malha fechada

fica pouco amortecida, com aumento do sobressinal para $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo de estabelecimento maior que 200 s . Vale salientar que o sinal de temperatura apresentado nos gráficos corresponde à saída real do sensor, antes do bloco correspondente à dinâmica parasita.

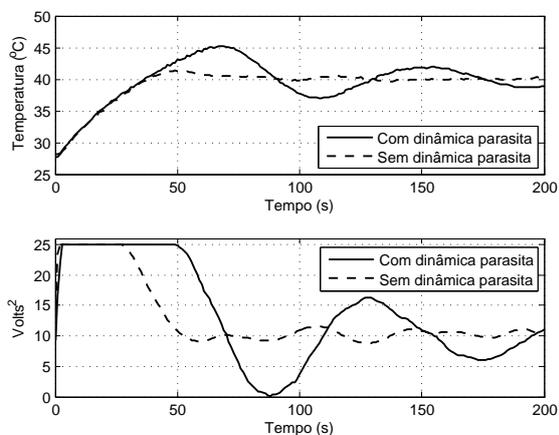


Figura 6: Resposta da planta em malha fechada com introdução de falha no sensor ($\tau = 20\text{ s}$). Gráfico superior: Leitura do sensor de temperatura. Gráfico inferior: Sinal de controle u .

5.1 Índice de anomalia

A Figura 7 apresenta os valores do índice de anomalia I_a obtidos para cada um dos 30 experimentos realizados. Como se pode observar, já há uma discreta elevação do índice de anomalia a partir de $\tau = 3$, que se torna bastante pronunciada a partir de $\tau = 4$. Vale ressaltar que a degradação no desempenho do sistema ainda se mostra modesta com $\tau = 4$, como mostra a Figura 8. Tal resultado revela que o uso do índice de anomalia proposto permitiria detectar a presença da falha incipiente antes que esta comprometesse a operação do sistema de controle. Com isso, haveria tempo hábil para agendar a limpeza ou troca do sensor, sem a necessidade de interromper a operação em caráter emergencial.

6 Conclusões

O índice de anomalia proposto neste trabalho se mostrou de valia para detectar possíveis falhas incipientes de sensor em um processo térmico de laboratório. Os resultados obtidos mostraram que a falha podia ser detectada ainda em um estágio inicial, quando o desempenho do sistema em malha fechada tinha sido pouco alterado com respeito às condições nominais de operação. Vale salientar que a detecção foi realizada durante a própria tarefa de controle, não sendo necessário abrir a malha para a realização de testes de integridade do sensor. Cabe também ressaltar que o índice de anomalia foi calculado empregando o modelo

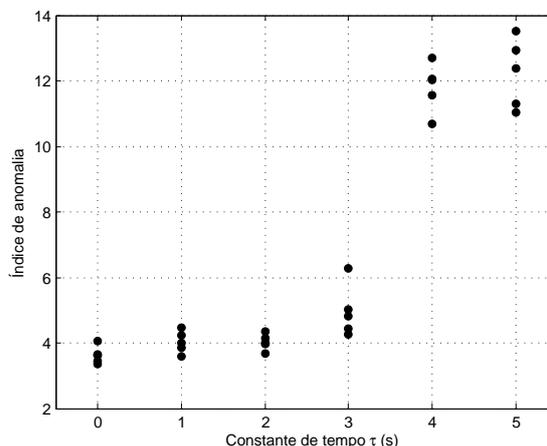


Figura 7: Índices de anomalia obtidos para diferentes valores da constante de tempo τ associada à falha incipiente do sensor.

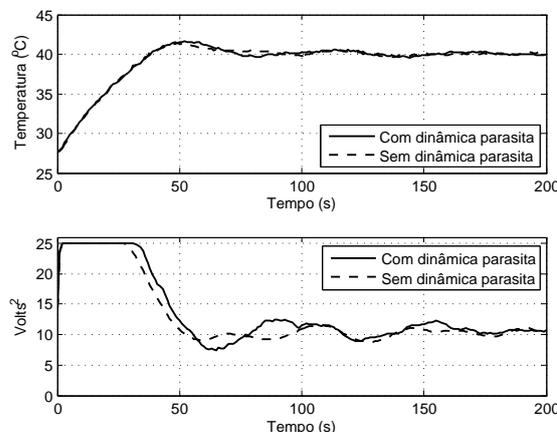


Figura 8: Resposta da planta em malha fechada com introdução de falha no sensor ($\tau = 4\text{ s}$). Gráfico superior: Leitura do sensor de temperatura. Gráfico inferior: Sinal de controle u .

interno do próprio controlador DMC, não se fazendo necessários experimentos adicionais para a implementação do detector de falhas.

Trabalhos futuros poderiam investigar o uso desta abordagem com outros tipos de modelo, tais como funções de transferência ou representações no espaço de estados. Também seria útil considerar o problema de isolamento de falhas, em particular no caso de sistemas com múltiplas entradas e saídas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP (2011/17610-0), CAPES (Pró-Engenharias) e CNPq (PIBIC e Produtividade em Pesquisa).

Referências

- Camacho, E. and Bordons, C. (2004). *Model Predictive Control*, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer-Verlag GmbH.
- Chen, X., Li, S. H., Zhai, J. Y. and Li, Q. (2009). Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit, *Expert Systems with Applications* **36**(1): 716 – 723.
- Delfino, T. N., Puttini, L. C. and Galvão, R. K. H. (2010). Failure prognosis of an air flow sensor, *Proc. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, MS*, pp. 622–628.
- Eshaghi, S., Kharrati, H., Badamchizadeh, M. and Hasanzadeh, I. (2012). A predictive controller based on dynamic matrix control for a non-minimum phase robot manipulator, *International Journal of Control, Automation and Systems* **10**(3): 574–581.
- Lan, J., Li, D. W., Yang, N. and Xi, Y. G. (2011). Implementation of dynamic matrix control on field programmable gate array, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* **16**(4): 441–446.
- Maciejowski, J. (2002). *Predictive Control: With Constraints*, Pearson Education, Prentice Hall.
- Vachtsevanos, G., Lewis, F. L., Roemer, M., Hess, A. and Wu, B. (2006). *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*, John Wiley, Hoboken, NJ.