
CONTROLADORES ADAPTATIVOS DE TEMPERATURA EM UM TÚNEL PSICROMÉTRICO

Paulo Henrique de Miranda Montenegro*

phmontenegro@bol.com.br

Benedito Santana de Oliveira*

bene@ct.ufpb.br

José Antônio Riul*

riul@ct.ufpb.br

Simplicio Arnaud da Silva*

Arnaud@dtm.ct.ufpb.br

*Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Tecnologia Mecânica
Campus I - Cidade Universitária, CEP 58.059-900 - João Pessoa PB.

ABSTRACT

This work aims at presenting the project of adaptive controllers for temperature control in a psychrometric tunnel. The tunnel is made of an airing system and a cooling system. The fan is put into motion by a continuous current engine which is controlled by a computer to engender and to move an unsteady air flow in the duct. The air temperature is measured by a sensor attached to the end of the tunnel. The temperature control is carried out in real time with the parameter system estimated by the algorithm of the recursive least-squares. A PI controller through pole placement and a generalized predictive controller (GPC) are projected and used to control the air flow temperature. Both control strategies to be used, are based on the system explicit model. The controllers are implemented through a computer program and through an input and output data board. Temperature response curves, evolution curves of the tunnel estimated parameters, control of variable curves, and estimation error curves are shown as experimental results.

KEYWORDS: Tunnel, System identification, Adaptive control, Temperature.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o projeto de controladores adaptativos para controle de temperatura em um túnel psicrométrico. O túnel é composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração. O ventilador é movido por um motor de corrente contínua controlado por um computador para gerar e deslocar um fluxo de ar variável no interior do duto. A temperatura do ar é medida por um sensor fixado na extremidade do túnel. O controle de temperatura é realizado em tempo real, com os parâmetros do sistema estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR). São projetados e usados um controlador PI via imposição de pólos e um controlador preditivo generalizado (GPC) para o controle da temperatura do fluxo de ar. As duas estratégias de controle a serem usadas, baseiam-se em um modelo explícito do sistema. Os controladores são implementados através do programa computacional, e de uma placa de entrada e saída de dados. São mostrados como resultados experimentais: curvas das respostas de temperatura, curvas das evoluções dos parâmetros estimados do túnel, curvas das variáveis de controle e curvas dos erros de estimação.

PALAVRAS-CHAVE: Túnel, Identificação de sistemas, Controle Adaptativo, Temperatura.

Artigo submetido em 17/05/2006

1a. Revisão em 25/07/2006

2a. Revisão em 20/09/2006

Aceito sob recomendação do Editor Associado

Prof. José Roberto Castilho Piqueira

1 INTRODUÇÃO

Um túnel psicrométrico composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração é utilizado como protótipo para realização de controle de temperatura. O projeto do equipamento é similar a de um túnel de vento de baixa velocidade e foi construído em metal com seção transversal quadrada de 254 mm² de área, possuindo janelas removíveis que permitem acesso ao seu interior, para adição de instrumentos, além dos já existentes. O fabricante dividiu o equipamento em duas partes principais: a primeira é denominada de sistema de ventilação e a segunda, de sistema de refrigeração. Para realização do controle de temperatura, somente a parte do túnel denominada de sistema de ventilação foi utilizada, com adaptação de um motor de corrente contínua ao ventilador. O ventilador tem as funções de gerar o fluxo de ar variável na temperatura ambiente e deslocá-lo no interior do duto forçando sua passagem através de um conjunto de resistências elétricas. Na obtenção de um modelo matemático do túnel, os parâmetros do sistema são estimados em tempo real pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), visando a atualização dos mesmos, dado o comportamento não-linear do túnel. A ação de controle da temperatura será realizada por dois controladores auto-ajustáveis; PI via imposição de pólos e GPC, dada a dinâmica não-linear do sistema. Foram usados os controladores PI e GPC, no intuito de testar o desempenho do sistema sob ação de um controlador sub-ótimo e outro ótimo. Os controladores da família PID constituem cerca de 90% dos instalados atualmente na indústria (Behar e Iranzo, 2003). Segundo Rúbio e Sánchez (2004), o GPC tem se tornado um dos métodos mais populares no âmbito dos controladores preditivos, tanto no campo industrial, como no acadêmico. Como resultado deste trabalho, são apresentadas curvas experimentais do desempenho do sistema, da variável de controle, dos parâmetros estimados do sistema e do erro de estimação.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O túnel psicrométrico, conforme mostrado na figura 1, é dividido em duas partes principais. A primeira denominada sistema de ventilação, é composta por um ventilador centrífugo, pelos aquecedores de ar, pelos umidificadores por vapor e pelo medidor de fluxo de ar. A segunda denominada de sistema de refrigeração é composta por um compressor-condensador de ar condicionado, um umidificador, um painel de controle e pelos instrumentos. A figura 1 mostra a parte referente ao sistema de ventilação, utilizada para o controle de temperatura, composta pelo motor cc, pelo ventilador, pelas resistências elétricas, pelo transdutor de temperatura, pelo duto de escoamento do fluxo de ar.

Para implementação de controladores no túnel, foi adaptado ao ventilador um motor de corrente contínua de 1,2 hp, 180

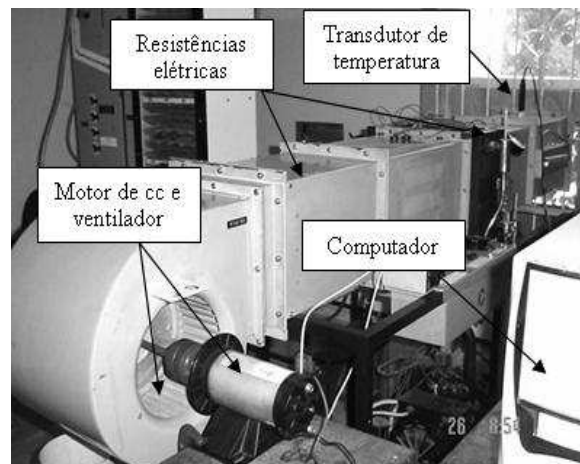


Figura 1: Túnel psicrométrico

Vcc comandado por um computador. O ventilador tem a função de gerar um fluxo de ar variável na temperatura ambiente e deslocá-lo no interior do duto do túnel forçando sua passagem através de dois conjuntos de resistências elétricas, um de 2 kW e outro 1 kW. Fazem parte também do sistema: um transdutor de temperatura instalado na extremidade de saída do ar do duto, um computador PC-Celeron-600 MHz, com 256Mb de memória RAM, um conversor DA/DC, e um amplificador de sinal. A interface entre o computador e o sistema é realizada através de uma placa interna de entrada e saída de dados, marca Quatech, modelo daq.801, comandada pelo programa computacional LabVIEW.

No processo de estimação dos parâmetros do túnel, o motor de corrente contínua foi acionado em malha aberta por uma função tipo degrau acrescida de ruído branco de média nula, de amplitude igual a 1% do valor do degrau. O funcionamento do motor aciona o ventilador gerando o fluxo de ar no interior do duto. O fluxo é proporcional a velocidade de rotação do ventilador e tem sua temperatura alterada ao entrar em contato com as resistências elétricas. A temperatura da massa de ar é captada pelo transdutor em tempo real e enviada ao computador, onde é processada juntamente com a excitação enviada ao motor. Utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), os parâmetros do túnel são estimados em tempo real, com período de amostragem de 1 segundo. O modelo paramétrico escolhido para o túnel foi o ARX, de segunda ordem, após verificação através do critério de Akaike. Foram geradas onze funções de transferência discretas, em onze pontos de operação na faixa de trabalho proposta, para verificação do comportamento dinâmico da planta. Utilizando-se a função de transferência obtida no ponto de operação intermediário, obteve-se a resposta simulada que foi comparada com os valores de temperatura captados em toda faixa de trabalho. Dessa forma, verificou-

se que o túnel apresenta comportamento dinâmico não-linear.

3 CONTROLADOR AUTO-AJUSTÁVEL (STR)

O controlador auto-ajustável (STR) é um tipo de controlador adaptativo, que automatiza as tarefas de modelagem matemática, projeto e implementação da lei de controle. O STR é explícito quando as tarefas de modelagem matemática, projeto e implementação da lei de controle são realizadas a partir dos parâmetros estimados da planta. No STR, os parâmetros estimados do sistema são determinados e atualizados, à cada período de amostragem, através do MQR. O diagrama de blocos de um STR explícito é apresentado na figura 2. No diagrama de blocos destacam-se duas malhas fechadas. A malha inferior composta pelo processo e pela realimentação de saída, e a superior composta pelo estimador de parâmetros, pelo projeto da lei de controle e pelo controlador ajustável. No STR os parâmetros estimados são considerados como se fossem os parâmetros reais do sistema. Esta abordagem é baseada no princípio da equivalência à certeza, conforme Hemerly (1996).

Controladores como: Proporcional Integral Derivativo (PID), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD), de Variância Mínima (MV), de Variância Mínima Generalizado (GMV), Linear Quadrático Gaussiano (LQG) e Controlador Preditivo Generalizado (GPC), podem ser utilizados para o projeto da lei de controle.

A estimação dos parâmetros do sistema em tempo real é a essência do STR. Dentre os algoritmos aplicáveis à esta tarefa cita-se o dos mínimos quadrados recursivo (MQR) com fator de esquecimento, conforme Aguirre (2000), Ljung (1987), Hemerly (1996), Rúbio e Sánchez (1996) e Coelho e Coelho

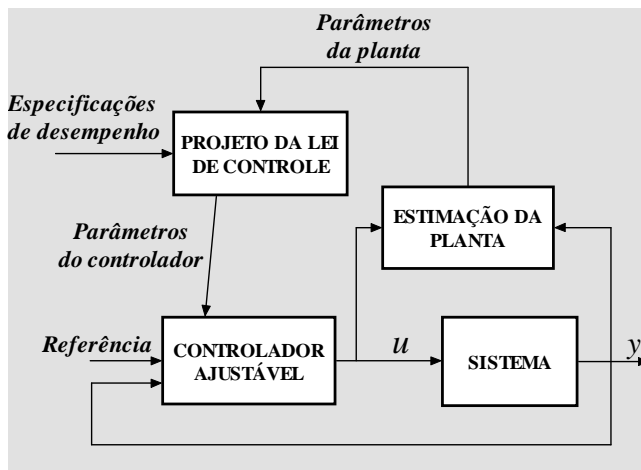


Figura 2: Diagrama de blocos do STR explícito

(2004). Os algoritmos recursivos usam as estimativas do vetor $\theta(t)$, prevista a partir dos instantes anteriores ao instante de tempo t , para obtenção das estimativas $\theta(t+1)$, conforme indica a equação(1).

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \text{atualização} \quad (1)$$

Um modelo paramétrico quando utilizado para projeto de controladores não representa uma descrição complexa do sistema, mas deve descrever com grande precisão as características dinâmicas essenciais para o projeto do controlador (Blondel *et alii.*,1997). Diversos modelos paramétricos podem ser utilizados para representar os sistemas, entre eles, linear do tipo ARMAX, dado pela equação(2).

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (2)$$

onde:

z^{-1} – operador atraso, tal que $z^{-1}y(t) = y(t-1)$;

$u(t)$ e $y(t)$ – são respectivamente o sinal de controle e a saída do sistema;

$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$; denominador da função de transferência do sistema;

$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$; numerador da função de transferência do sistema;

$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$; numerador da função de transferência do filtro auto regressivo;

$e(t)$ – ruído branco de média nula;

d – atraso de transporte do sistema;

n_a, n_b, n_c – ordem dos polinômios A, B e C.

Com $C(z^{-1}) = 1$, o modelo ARMAX, resulta no modelo ARX, que pode ser escrito conforme o modelo de regressão linear mostrado na equação(3).

$$y(t) = \phi^T(t-1)\theta + e(t) \quad (3)$$

onde:

$$\phi^T(t-1) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-1-n_b)]$$

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]$$

A estimação recursiva do vetor de parâmetros θ^T é regida pelas seguintes equações:

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t) [y(t) - \phi^T(t)\theta(t-1)] \quad (4)$$

$$K(t) = P(t-1)\phi(t) [I - \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)]^{-1} \quad (5)$$

$$P(t) = \frac{P(t-1)}{\lambda e} [I - K(t)\phi^T(t)] \quad (6)$$

onde :

$\mathbf{K}(t)$ – ganho do estimador;

$P(t)$ – matriz de covariância dos parâmetros estimados;

λe – fator de esquecimento;

I – matriz identidade.

No projeto do controlador PI via imposição de pólos, adotado-se o o modelo ARX, obtido a partir da equação(3), e mostrado na equação(7).

$$y(t) = y_u(t) + n(t) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t-1) + \frac{1}{A(z^{-1})}e(t) \quad (7)$$

onde:

$y_u(t)$ – modelo do sistema;

$n(t)$ – modelo da perturbação.

No projeto do controlador GPC, admite-se o sistema representado por um modelo do tipo CARIMA, conforme mostrado na equação(8).

$$y(t) = y_u(t) + n(t) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t-1) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta A(z^{-1})}e(t) \quad (8)$$

onde:

$\Delta = 1 - z^{-1}$ – operador diferença.

4 CONTROLADOR PI VIA IMPOSIÇÃO DE PÓLOS

Rúbio e Sánchez (1996) apresentam a estrutura do controlador PI discreto, conforme equação(9).

$$G_c(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} = \frac{q_0z + q_1}{z - 1} \quad (9)$$

A técnica usada para determinação dos parâmetros do controlador é a de imposição de pólos. A idéia consiste em ajustar o controlador de modo que a resposta do sistema em malha fechada atenda às especificações de desempenho impostas ao sistema. Para isto, o polinômio característico do conjunto controlador-sistema em malha fechada é igualado a um segundo polinômio determinado a partir de especificações de desempenho. Os pólos dominantes do segundo polinômio são obtidos a partir do fator de amortecimento e da frequência angular natural. O sistema em análise, o túnel psicrométrico, tem o modelo matemático representado por uma função de transferência discreta geral de segunda ordem como mostrado na equação(10).

$$G_p(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1z + b_2}{z^2 + a_1z + a_2} \quad (10)$$

Da equação(9) e da equação(10), chega-se à função de transferência em malha fechada do conjunto controlador-planta, conforme equação(11).

$$M(z) = \frac{B(z)Q(z)}{A(z)P(z) + B(z)Q(z)} = \frac{(b_1z + b_2)(q_0z + q_1)}{(z^2 + a_1z + a_2)(z - 1) + (b_1z + b_2)(q_0z + q_1)} \quad (11)$$

O denominador da equação(11) é o polinômio característico do controlador-planta, como mostra a equação(12).

$$P_c(z) = z^3 + (a_1 - 1 + b_1q_0)z^2 + (a_2 - a_1 + b_1q_1 + b_2q_0)z + b_2q_1 - a_2 \quad (12)$$

Definindo $z_1 = \nu + j\omega$ e $z_2 = \nu - j\omega$ como sendo os pólos dominantes desejados para o sistema em malha fechada, tem-se o polinômio $P_d(z) = (z - z_1)(z - z_2)$ como uma parcela do polinômio característico desejado em malha fechada, representado pela equação(13).

$$P_d(z) = z^2 - 2\nu z + \nu^2 + \omega^2 \quad (13)$$

Como o polinômio característico da equação(12) é de terceira ordem, e o produto dos pólos desejados é um polinômio de segunda ordem, um polinômio observador de primeira ordem; $P_o(z) = (z - p)$, é multiplicado pela equação(13), resultando na equação(14).

$$P_c(z) = (z^2 - 2\nu z + (\nu^2 + \omega^2))(z - p) = z^3 - (2\nu + p)z^2 + (\nu^2 + \omega^2 + 2\nu p)z - \nu^2 p - \omega^2 p \quad (14)$$

Igualando a equação(12) com a equação(14), chega-se à um sistema de equações e resolvendo-o, obtém-se os parâmetros p e q_0 e q_1 do controlador PI dado pela equação(9), conforme as equações(15), (16) e (17).

$$p = \frac{b_1b_2[(a_2 - a_1) - (\nu^2 + \omega^2)] - b_2^2(a_1 + 2\nu - 1)b_1^2a_2}{b_1^2(\nu^2 + \omega^2) + 2\nu b_1b_2 + b_2^2} \quad (15)$$

$$q_0 = \frac{1 - 2\nu - p - a_1}{b_1} \quad (16)$$

$$q_1 = \frac{a_2 - p(\nu^2 + \omega^2)}{b_2} \quad (17)$$

De posse dos parâmetros, p , q_0 e q_1 , a variável de controle é determinada conforme equação(18).

$$u(k) = q_0e(k) + q_1e(k-1) + u(k-1) \quad (18)$$

As especificações de desempenho impostas ao controlador-planta, neste projeto, são:

sobre-sinal; $ss = 10\%$;

tempo de acomodação; $t_s = 60$ seg, para faixa de tolerância de $\pm 2\%$ do erro em regime permanente.

Os pólos desejados são determinados a partir das especificações e considerando que o controlador-planta siga o comportamento do polinômio característico contínuo dado pela equação(19).

$$P(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (19)$$

onde:

ω_n – frequência angular natural (rad/s);

ξ – fator de amortecimento.

Com as especificações de desempenho e o comportamento do polinômio característico definidos (Hemerly, 1996), os pólos dominantes em malha fechada requeridos para projeto do controlador são: $z_{1,2} = 0,9332 \pm 0,0653i$.

5 CONTROLADOR PREDITIVO GENERALIZADO (GPC)

O GPC é da família de controladores de horizonte estendido (Camacho e Bordóns, 2004) e utiliza um modelo explícito do sistema, na obtenção da variável de controle, determinada pela minimização de uma função custo (Camacho e Bordóns, 2004). O GPC foi proposto inicialmente por Clarke *et alii* (1987) e desde então tem se tornado um dos métodos mais populares no âmbito do controle preditivo, sendo utilizado com êxito em numerosas aplicações, abrangendo plantas instáveis e de fase não mínima. Possui ampla aplicação nas indústrias química e petroquímica, mostrando-se robusto quanto a sobreparametrização do sistema e o atraso de transporte. O GPC consiste basicamente no cálculo de uma seqüência de ações futuras de controle, através da minimização da seguinte função custo, que é a esperança matemática de uma função quadrática que mede a distância entre a saída predita do sistema e a sequencia de referência sobre o horizonte de predição, adicionando à função quadrática uma medida do esforço de controle (Behar e Iranzo, 2003).

$$J = E\left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) \left[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (20)$$

onde:

$E\{.\}$ – é a esperança matemática;

$\hat{y}(t+j|t)$ – predição ótima j passos à frente da saída do processo, usando as saídas conhecidas até o instante t ;

N_1 e N_2 – horizontes mínimo e máximo da função custo;

N_u – horizonte de controle;

$\delta(j)$ – seqüência de ponderação sobre o sinal de erro;

$\lambda(j)$ – seqüência de ponderação sobre a variável de controle;

$w(t+j)$ – referência.

Para minimizar a função custo da equação(20), é necessário a determinação da predição ótima de $y(t+j)$ no intervalo $N_2 \geq j \geq N_1$. Considerando $C(z^{-1})=1$, no modelo da perturbação $n(t)$ mostrado na equação(8), chega-se à equação(21) de Diophantine (Camacho e Bordóns, 2004), (Rúbio e Sánchez, 1996).

$$\frac{1}{\tilde{A}(z^{-1})} = E_j(z^{-1}) + z^{-j} \frac{F_j(z^{-1})}{\tilde{A}(z^{-1})} \quad (21)$$

onde:

$$\tilde{A}(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1});$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}z^{-1} + \dots + f_{j,na}z^{-na};$$

$$E_j(z^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,1}z^{-1} + \dots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)}.$$

Multiplicando a equação(8) por $E_j(z^{-1})z^j\Delta$ obtém-se:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(z^{-1})E_j(z^{-1})y(t+j) = \\ E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \end{aligned} \quad (22)$$

Resolvendo a equação(21) para $E_j(z^{-1})$ e substituindo o resultado na equação(22) resulta em:

$$\begin{aligned} y(t+j) = F_j(z^{-1})y(t) + \\ E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \end{aligned} \quad (23)$$

Como o grau do polinômio $E_j(z^{-1})$ é $j-1$, os termos do ruído da equação(23), encontram-se no futuro, portanto a melhor predição é dada por Rúbio e Sánchez (1996).

$$\hat{y}(t+j|t) = G_j(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + F_j(z^{-1})y(t) \quad (24)$$

onde:

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})$$

O conjunto de predições para j passos à frente, é representado na forma matricial pela equação(25).

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{F}(z^{-1})y(t) + \mathbf{G}'(z^{-1})\Delta u(t-1) \quad (25)$$

onde :

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+d+1/t) \\ \hat{y}(t+d+2/t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+d+N/t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{u} = [\Delta u(t) \quad \Delta u(t+1) \quad \cdots \quad \Delta u(t+N-1)]^T \quad (27)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{G}'(z^{-1}) = \begin{bmatrix} z(G_{d+1}(z^{-1}) - g_0) \\ z^2(G_{d+1}(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1}) \\ \vdots \\ z^N(G_{d+N}(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1} \cdots \\ \cdots g_{N-1} z^{-(N-1)}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{F}(z^{-1}) = [F_{d+1}(z^{-1}) \quad F_{d+2}(z^{-1}) \quad \cdots \quad F_{d+N}(z^{-1})]^T \quad (30)$$

O termo $\mathbf{G}'(z^{-1})\Delta u(t-1)$ da equação (25) diz respeito ao tempo passado e pode ser agrupado no vetor \mathbf{f} , que representa a resposta livre, conforme mostra a equação (31).

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (31)$$

Finalizando, a equação(20) pode ser reescrita como mostra a equação(32).

$$J = (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{w})^T (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{w}) + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \quad (32)$$

onde :

$$\mathbf{w} = [w(t+d+1) \quad w(t+d+2) \quad \cdots \quad w(t+d+N)]^T \quad (33)$$

O mínimo da função custo, considerando ausência de restrições, é obtido quando o gradiente de J é igualado a zero, o que conduz à lei de controle dada pela equação(33).

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (33)$$

No GPC é utilizado a estratégia de horizonte deslizante, e o sinal de controle enviado ao processo é o primeiro elemento do vetor \mathbf{u} obtido através da equação(33), e mostrado na equação (34).

$$\Delta u(t) = K(w - f) \quad (34)$$

onde:

$$K = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$$

O projeto e implementação do GPC auto-ajustável é realizado, considerando o modelo matemático do túnel psicrométrico descrito na equação(8). No projeto do GPC foram considerados os fatores de ponderação $\delta(j)=1$ e $\lambda(j)$ constante, conforme Clarke (1987). O controlador é sintonizado com $\lambda(j)=0,10$ e com os horizontes $N_1=1$, $N_2=2$ e $N_u=2$, dado o atraso de transporte ser considerado fixo no valor de um segundo.

6 RESULTADOS

Neste trabalho foram projetados e implementados controladores auto-ajustáveis PI via imposição de pólos e GPC para o controle de temperatura em um túnel psicrométrico, dada sua dinâmica não-linear. As implementações experimentais foram realizadas através de programas computacionais desenvolvidos no ambiente LabVIEW, utilizando-se tempo de amostragem de 1 segundo, determinado a partir das especificações de desempenho impostas ao sistema, conforme Aström (1995). O desempenho do sistema foi avaliado no intervalo de tempo de 700 segundos. Os testes foram iniciados com o vetor de estimativas $\theta(t)$ nulo. Para que a planta fosse parcialmente estimada, um controlador proporcional de ganho $k_p = 2,0$, foi utilizado durante os 15 segundos iniciais, evitando-se uma ação de controle adaptativo inadequada. A partir dos 15 segundos iniciais, os controladores auto-ajustáveis foram acionados automaticamente.

Nos experimentos, usou-se como referência, uma seqüência de degraus de temperatura, com valores de: 51,0 °C ($0 \leq t < 150s$), 46,0 °C ($150s \leq t < 300s$), 41,0 °C ($300s \leq t < 450s$), 38,0 °C ($450s \leq t < 550s$) e 41,0 °C ($t \geq 550s$) na avaliação do comportamento do sistema, como mostrado na figura 3. Nesta figura, mostram-se também as respostas do sistema sob ação dos controladores PI e GPC. Os testes foram iniciados com a temperatura do ar em torno de 60,0 °C.

As tabelas 1 e 2 mostram os parâmetros de desempenho obtidos nos experimentos, conforme as respostas da figura 3.

A figura 4 mostra a variável de controle dos experimentos realizados. Verifica-se que não ocorreu saturação durante a

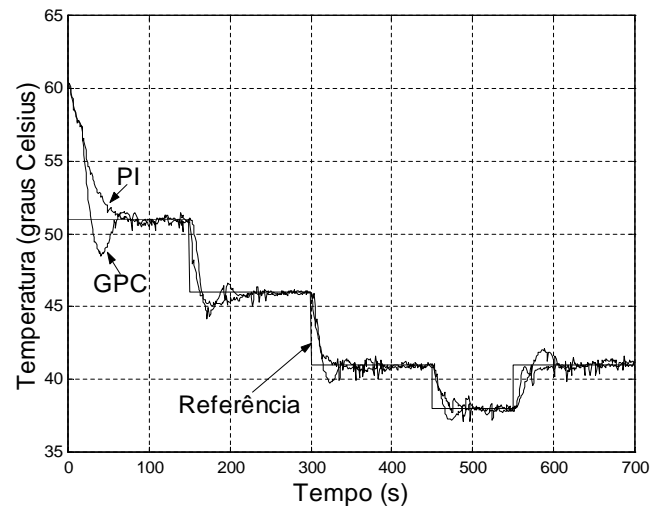


Figura 3: Respostas experimentais do sistema, sob ação dos controladores PI e GPC, à uma seqüência de degraus.

Tabela 1: Parâmetros de desempenho com o controlador PI.

| | PI | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 51 | 46 | 41 | 38 | 41 |
| Sobre-sinal (%) | 4,2 | 19,2 | 9,0 | 9,6 | - |
| Tempo de acomodação (s) | 75,0 | 80,0 | 70,0 | 40,0 | 53,0 |

Tabela 2: Parâmetros de desempenho com o controlador GPC

| | GPC | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 51 | 46 | 41 | 38 | 41 |
| Sobre-sinal (%) | 27,1 | 36,1 | 25,9 | 27,0 | 33,3 |
| Tempo de acomodação (s) | 110 | 70 | 80 | 70 | 13,0 |

realização dos experimentos, dado que o valor máximo de tensão que o motor de corrente contínua admite é de 110 Volts.

Nas figuras 5 e 6 tem-se a evolução dos parâmetros estimados do sistema, através do MQR, para os controladores PI e GPC. Nota-se que no início do processo, os parâmetros oscilam, porque o MQR foi iniciado com o vetor de parâmetros nulo. Foi utilizado o fator de esquecimento, $\lambda e = 0,99$, objetivando manter o estimador em alerta (maior ponderação das medidas mais atuais) e matriz de covariância inicial de $10000I$.

Nas figuras 7 e 8, tem-se os erros de estimação, com as ações dos controladores PI e GPC, respectivamente, durante o res-

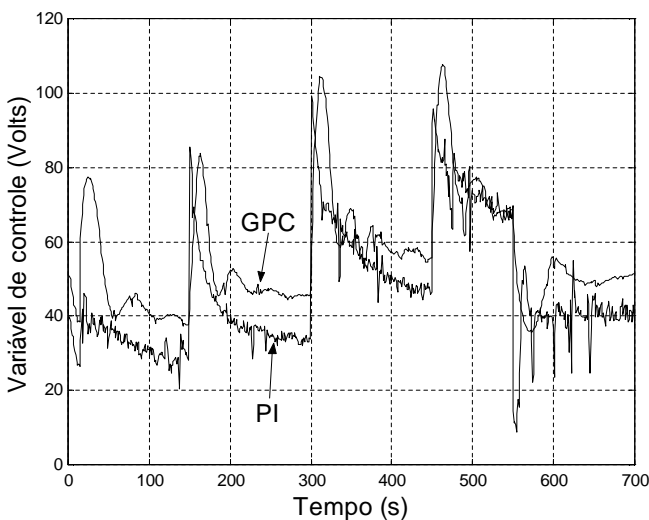


Figura 4: Variável de controle do sistema sob ação dos controladores PI e GPC

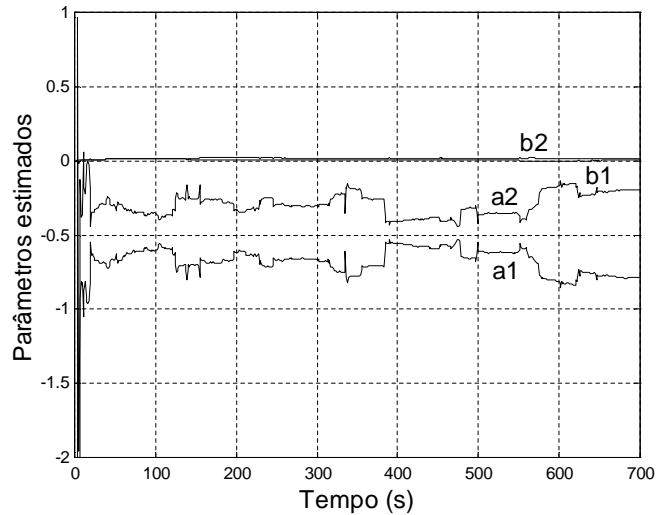


Figura 5: Parâmetros estimados do sistema, na ação do controlador PI

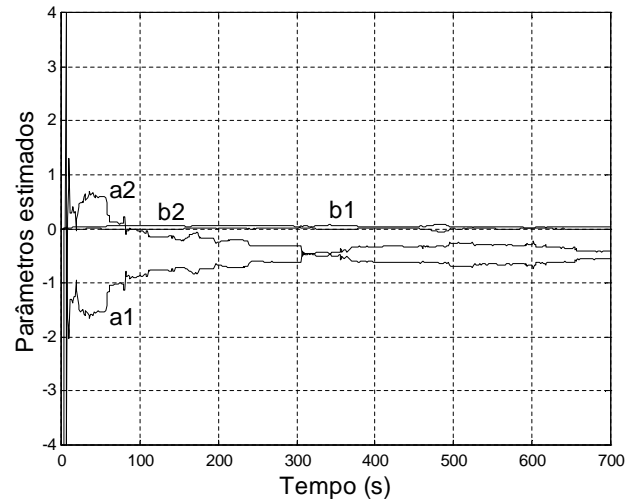


Figura 6: Parâmetros estimados do sistema, na ação do controlador GPC

friamento do ar. Os valores máximos dos erros de estimação são de $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sistema sob ação do controlador PI e de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sistema sob ação do GPC.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho projetou-se e implementou-se controladores auto-ajustáveis PI e GPC para o controle de temperatura do fluxo de ar em um túnel psicrométrico. Os algoritmos usados nos controladores auto-ajustáveis foram projetados pelo método explícito. Os parâmetros do sistema estimados em tempo real, utilizaram o fator de esquecimento, para garantir avaliação contínua da sua dinâmica não-linear.

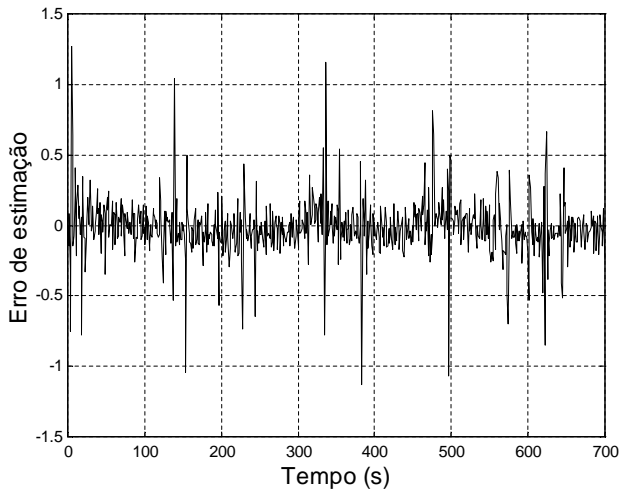


Figura 7: Erro de estimação na ação do controlador PI

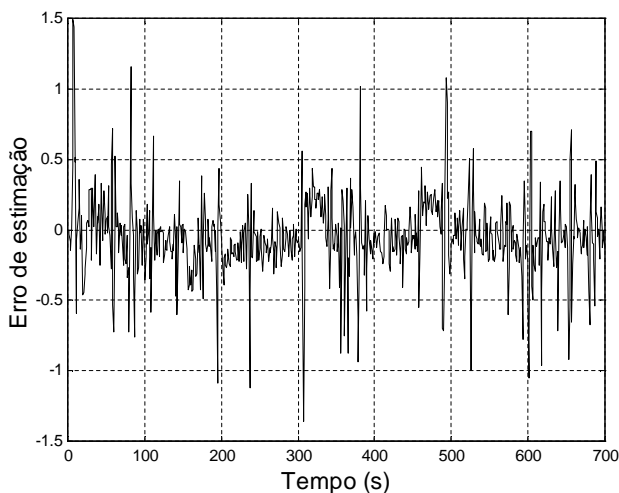


Figura 8: Erro de estimação na ação do controlador GPC

O desempenho do sistema sob ação dos controladores projetados foi avaliado no intervalo de tempo de 700 segundos, tendo como referência uma sequência de degraus. Dos resultados experimentais, observou-se que a resposta do sistema sob ação do controlador PI, ultrapassou o limite de sobre-sinal de 10%, em um único trecho da trajetória e o tempo de acomodação, $t_s=60$ s, só foi menor que o especificado nos dois últimos trechos da trajetória. A resposta sob ação do controlador GPC, ultrapassou o limite de sobre-sinal de 10%, em todos os trechos da trajetória e o tempo de acomodação, $t_s=60$ s, só foi menor que o especificado no último trechos da trajetória. Diante dos resultados conclui-se que o sistema apresentou melhor desempenho quando usado o controlador PI; porém, com ajustes nas sequências de ponderação e nos horizontes da função custo do controlador GPC, o desempenho do sistema poderá ser melhorado. Finalizando, o uso

dos controladores auto-ajustáveis PI e GPC, para o controle de temperatura do túnel, foi relevante tendo em vista sua dinâmica não-linear.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., 2000, Introdução à Identificação, Técnicas Lineares e Não – Lineares Aplicadas a Sistemas Reais, Ed. UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- Astrom, K. J. and Wittenmark, B., 1995, Adaptive Control. Ed. Addison Wesley, 2ª edição
- Behar, A. A. e Iranzo, M.M., 2003. Identificación y Control Adaptativo. Ed. Prentice Hall 1ª edição. Madri.
- Camacho, E.F e Bordóns, C. , 2004. Control Predictivo: Pasado Presente y Futuro , CEA IFAC.
- Clarke, D.W, Mohtadi, C., Tuffs, P.S., 1987. Generalized Predictive Control - Part I . The Basic Algorithm , Automática Vol 23 n° 02.
- Coelho, A.A.R. e Coelho, L.S. 2004. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares, 1ª edição Florianópolis. UFSC.
- Hemerly, E. M., 1996. Controle Por Computador de Sistemas Dinâmicos. Ed. Edgard Blucher. LTDA, S. Paulo, Brasil.
- Ljung, L., 1987. System Identification: Theory for the User, Ed. Prentice – Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Rúbio, F.R & Sánchez, M.J.L, 1996. Control Adaptativo y Robusto. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla.