

Controle preditivo generalizado auto-ajustável de temperatura em um túnel psicrométrico

TEMPERATURE SELF-TUNING GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL IN A PSYCHROMETRIC TUNNEL

Paulo Henrique de Miranda Montenegro
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal da Paraíba
José Antônio Riul
Benedito Santana de Oliveira
Simplicio Arnaud da Silva
Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia - Departamento de Tecnologia Mecânica

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo, projetar um controlador preditivo generalizado (GPC) auto-ajustável 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. Os parâmetros do sistema são estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo e um controlador GPC é projetado e usado para o controle da temperatura do fluxo de ar. GPC é uma estratégia específica de controle que se baseia no uso de um modelo explícito do sistema. O controlador é implementado através do programa computacional LabVIEW, e de uma placa de entrada e saída de dados. São mostrados como resultados experimentais: curva de resposta de temperatura, curva da evolução dos parâmetros estimados do túnel, curva do erro de estimação, e curva da variável de controle.

PALAVRAS CHAVE

Identificação. Controle Adaptativo. Temperatura.

ABSTRACT

This work has as objective the project a self-tuning generalized predictive controller (GPC) for temperature control in a psychrometric tunnel. The tunnel is composed of a ventilation system and a cooling system. The air blower is driven by one DC motor controlled

by a computer to generate and to move a variable flow of air inside the tunnel. The temperature of the air is measured by a sensor fitted to the end of the tunnel. The temperature control is accomplish in real time. The system parameters are estimates by the recursive least squares method and a GPC controller is projected and used in air flow temperature control. GPC is a specific strategy of control based on the explicit model of the system. The controller is implemented through the LabVIEW software and a data acquisition board. As experimental results are shown: temperature response, parameters estimates, estimation error and control variable.

KEYWORDS

Temperature. System Identification. GPC control.

INTRODUÇÃO

Um túnel psicrométrico composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração é utilizado como protótipo para realização do controle de temperatura. O projeto do equipamento é similar a de um túnel de vento de baixa velocidade. 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. Por conveniência o fabricante dividiu o equipamento em duas partes principais: a primeira é denominada sistema de ar e é composta pelo ventilador, pelos aquecedores de ar, pelos umidificadores por vapor e pelos medidores de fluxo de ar. A segunda parte é denominada de sistema refrigerante e é composta por um compressor-condensador,

um umidificador, e pelos controles e instrumentação. Para realização do controle ativo de temperatura, foi adaptado ao ventilador um motor de corrente contínua. 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 do conjunto de resistências elétricas. Faz parte também do sistema um transdutor de temperatura instalado na extremidade de saída do duto. Na obtenção de um modelo matemático do túnel, os parâmetros do sistema são estimados em tempo real pelo método recursivo dos mínimos quadrados (MQR). A ação de controle da temperatura é realizada por um controlador GPC auto-ajustável. Segundo Rúbio & Sánchez (2004), o GPC tem se tornado um dos métodos mais populares no âmbito dos controladores preditivos, tanto no campo industrial como no acadêmico. São apresentados resultados de simulação e experimentais mostrando o desempenho obtido para o sistema.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O túnel psicrométrico, conforme mostrado na Fig. 1, é dividido em duas partes principais: A primeira é denominada sistema de ventilação, e é composta pelo ventilador, pelos aquecedores de ar, pelos umidificadores por vapor e pelo medidor de fluxo de ar. A segunda é denominada de sistema refrigerante e é composta por um compressor-condensador, um umidificador, controles e instrumentação.

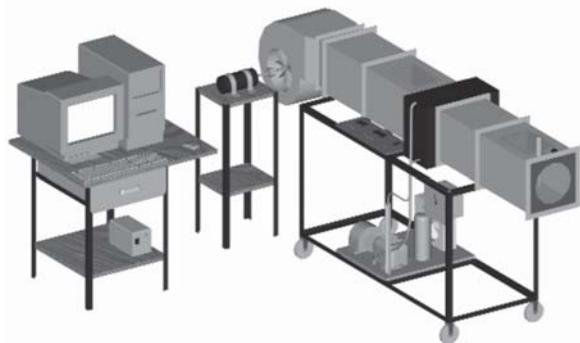


Figura 1 – Túnel psicrométrico

Para este trabalho, o equipamento foi adaptado para que seu ventilador fosse movido por um motor de cc, 180 V_{cc}, comandado por um computador. Este 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 dos conjuntos de resistências elétricas (2 kW e 1 kW), originais

do equipamento e que podem estar ou não funcionando ao mesmo tempo de acordo com a necessidade. Fazem parte também do sistema; um transdutor de temperatura instalado na extremidade de saída do duto, um computador PC – Celeron – 600 MHz, com 128Mb de memória RAM, um conversor CA/CC, 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. O tempo de amostragem de 1 segundo foi utilizado neste trabalho.

CONTROLE AUTO-AJUSTÁVEL

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. No STR as estimativas dos parâmetros do sistema são atualizadas e os parâmetros do controlador são obtidos em tempo real pela solução de um projeto que utiliza os parâmetros estimados do sistema. O diagrama de blocos de um STR explícito é apresentado na Fig. 3. (Astrom & Wittenmark, 1995).

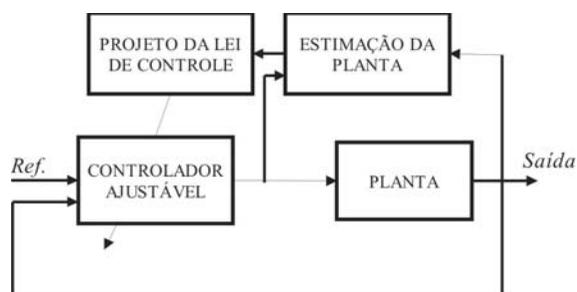


Figura 3 - Diagrama de blocos do STR explícito

No diagrama de blocos destacam-se duas malhas fechadas. A malha inferior é composta pelo processo e pela realimentação de saída e a superior pela presença do estimador de parâmetros, do projeto da lei de controle e do 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 (Hemerly, 1996) (Coelho & Coelho, 2004).

Diversas estratégias de controle podem ser utilizadas na fase de projeto do controlador, podendo-se citar a de mínima variância (MV), de mínima variância generalizado (GMV), o Linear Quadrático Gaussiano (LQG), os controladores Proporcional Integral Derivativo (PID), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD).

vativo (PD) e o Controlador Preditivo Generalizado (GPC).

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

Os algoritmos recursivos se valem das estimativas $\theta(t)$ dos parâmetros do sistema calculados anteriormente ao instante de tempo t , para obter de modo recursivo as novas estimativas, conforme indica a Eq. (1).

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

Um modelo linear adequado ao GPC é o do tipo CARIMA (Controller Auto-Regressive Integrated Moving-Average), mostrado na Eq. (2).

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

onde: $u(t)$ - são respectivamente o sinal de controle e a saída do processo

$y(t)$ - modelo do processo

$n(t)$ - modelo da perturbação

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc}$$

$e(t)$ - ruído branco de média zero

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

d - atraso de transporte do processo.

CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO (GPC)

O GPC é um tipo de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC) (Camacho & Bordóns, 2004), que utiliza um modelo explícito do processo para obter um sinal de controle minimizado por uma função custo. O GPC foi proposto por Clark et al (1987) e desde então tem se tornado um dos métodos mais populares no âmbito do controle preditivo sendo utilizado com êxito em numerosas aplicações, podendo tratar plantas instáveis e de fase não mínima. Possui ampla aplicação na indústria química e na petroquímica, mostrando-se robusto quanto a sobreparametrização, atraso de transporte incerto.

O GPC consiste no cálculo de uma sequência de ações futuras de controle de forma a minimizar o se-

guinte função custo.

$$J(N_1, N_2, N_u) = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) \left[y(t+j|t) - w(t+j) \right]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (3)$$

onde: $E\{\cdot\}$ - é a esperança matemática

$y(t+j|t)$ - 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

$\delta(j)$ e $\lambda(j)$ - seqüências de ponderação - trajetória de referência

Para minimizar a Eq. (3), é necessário a determinação da predição ótima de $y(t+j|t)$ no intervalo $t \leq j \leq N_2$. Considerando $C(z^{-1})=1$, no modelo da perturbação $n(t)$ do modelo CARIMA mostrado na Eq. (2), chega-se à seguinte equação Diofantina (Camacho & Bordóns, 2004):

$$\frac{1}{\tilde{A}(z^{-1})} = E_j(z^{-1}) + z^{-j} \frac{F_j(z^{-1})}{\tilde{A}(z^{-1})} \quad (4)$$

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

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

Multiplicando a Eq. (1) por $\tilde{A}(z^{-1})$ obtém-se:

$$\tilde{A}(z^{-1}) E_j(z^{-1}) y(t+j) = E_j(z^{-1}) B(z^{-1}) \Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1}) e(t+j) \quad (5)$$

Resolvendo a Eq. (4) para $E_j(z^{-1})$ e substituindo o resultado na Eq. (5) resulta em:

$$y(t+j) = F_j(z^{-1}) y(t) + E_j(z^{-1}) B(z^{-1}) \Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1}) e(t+j) \quad (6)$$

Como o grau do polinômio $E_j(z^{-1})$ é $j-1$, os termos do ruído da Eq. (6), encontram-se no futuro, e portanto a melhor predição vem dada por:

$$\hat{y}(t+j|t) = G_j(z^{-1}) \Delta u(t+j-d-1) + F_j(z^{-1}) y(t) \quad (7)$$

onde :

Conforme Camacho & Bordóns (2004), o conjunto de predições em j passos no futuro, conforme a Eq. (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y}(t+d+1|t) = G_{d+1}\Delta u(t) + F_{d+1}y(t) \\ \hat{y}(t+d+2|t) = G_{d+2}\Delta u(t+1) + F_{d+2}y(t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+d+N|t) = G_{d+N}\Delta u(t+N-1) + F_{d+N}y(t) \end{array} \right\} \quad (8)$$

Que pode ser representado na forma matricial indicada na Eq. (9).

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{F}(z^{-1})y(t) + \mathbf{G}'(z^{-1})\Delta u(t-1) \quad (9)$$

onde :

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+d+1/t) \\ \hat{y}(t+d+2/t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+d+N/t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N-1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{G}'(z^{-1}) = \begin{bmatrix} z(G_{d+1}(z^{-1}) - g_0) \\ z^2(G_{d+1}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1}) \\ \vdots \\ z^N(G_{d+N}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1} \cdots g_{N-1}z^{-(N-1)}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{F}(z^{-1}) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(z^{-1}) \\ F_{d+2}(z^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

O termo da Eq. (9) está no tempo passado e pode ser agrupado no vetor \mathbf{f} , que representa a resposta livre, conforme mostra a Eq. (15), deste modo a Eq. (3) pode ser rescrita como mostrada na Eq. (16).

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (15)$$

$$J = (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{w})^T (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{w}) + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \quad (16)$$

onde :

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

O mínimo da função custo, considerando ausência de restrições pode ser encontrada ao se igualar a zero o gradiente de J , conduzindo a lei de controle conforme a Eq. (17).

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (17)$$

No GPC é utilizado a estratégia de horizonte deslizante, onde o sinal de controle, que é enviado ao processo é o primeiro elemento do vetor \mathbf{u} , conforme a Eq. (18). O vetor \mathbf{K} é a primeira fila da matriz

$$\Delta u(t) = \mathbf{K}(\mathbf{w} - \mathbf{f}) \quad (18)$$

Neste trabalho o projeto e implementação do controlador GPC auto-ajustável, é realizado, considerando o modelo matemático do túnel psicrométrico discreto de segunda ordem ($na=2, nb=1, nc=0$ e $d=0$ com $C(z^{-1})=1$), onde a_r, a_z, b_0 e b_1 são os parâmetros a serem estimados pelo MQR.

O controlador GPC auto-ajustável explícito é implementado experimentalmente através de um programa computacional desenvolvido no ambiente LabVIEW 5.1. Seu funcionamento se dá conforme mostra o diagrama de blocos da Fig. 3.

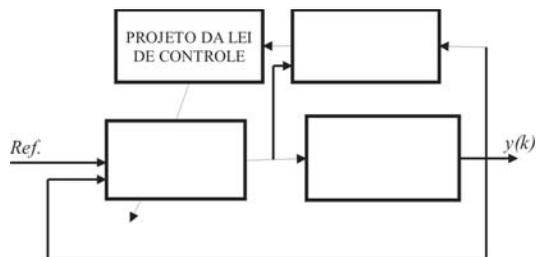


Figura 3 - Controlador GPC auto-ajustável explícito

Os parâmetros estimados do sistema, através do MQR, que usa como entrada a variável de controle $u(t)$ e como saída, a resposta $y(t)$ captada pelo sensor de temperatura, são utilizados no projeto e na implementação do controlador auto-ajustável, usando-se a Eq.(18), com um o tempo de amostragem de 01 (um) segundo. O projeto do GPC é implementado considerando os fatores $\delta(j)$ e $\lambda(j)$ iguais a 1 e 0,1 respectivamente com os horizontes N_1 , N_2 e N_u iguais a 1, 2 e 2 para o primeiro teste. No segundo teste utilizou-se λ igual a 0,15.

RESULTADOS

Os testes experimentais foram inicializados utilizando-se o vetor de estimativas com parâmetros nulos. Para evitar uma ação de controle adaptativo inadequada, foi utilizado durante os 15 segundos iniciais um controlador proporcional de ganho $k_p = 3,5$ para que a planta fosse parcialmente estimada, evitando com isto, uma ação de controle adaptativo inadequada. A partir dos 15 segundos iniciais, o GPC auto-ajustável foi acionado automaticamente.

Na realização experimental, usou-se como trajetória de referência, uma sequência de degraus de temperatura, com valores de 51,0 °C, 46,0 °C, 41,0 °C e 38,0 °C, como mostra a Fig. (4).. Observa-se nesta figura, a resposta do sistema sob ação do controlador GPC considerando os fatores iguais a 1 e 0,1 respectivamente, e o ar tendo temperatura inicial igual a 60,5 °C. A tabela 1 ilustra os parâmetros de desempenho obtidos no experimento 1, conforme a resposta do sistema da Fig. 4.

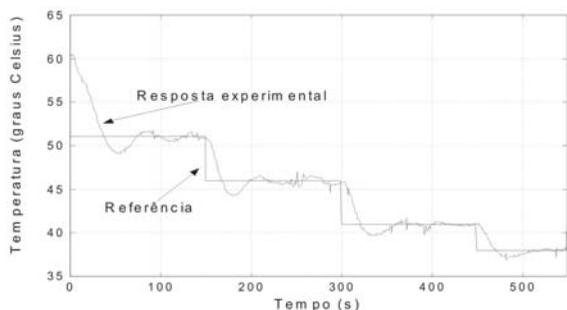


Figura 4 - Resposta experimental do sistema, à uma sequência de degraus, sob ação do controlador GPC

Tabela 1. Parâmetros de desempenho do experimento 1

Degrau de temperatura (°C)	51	46	41	38
Tempo de descida (s)	37,5	18	20	20,7
Sobre-sinal (%)	21	34	24	26,6
Tempo estabelecimento (s)	73	62	60	85

A Figura 5 mostra a variável de controle desse experimento. Verifica-se que não ocorreu saturação durante a realização do experimento. Observa-se mudança em seu comportamento após 15 s, onde inicia-se a ação do GPC.

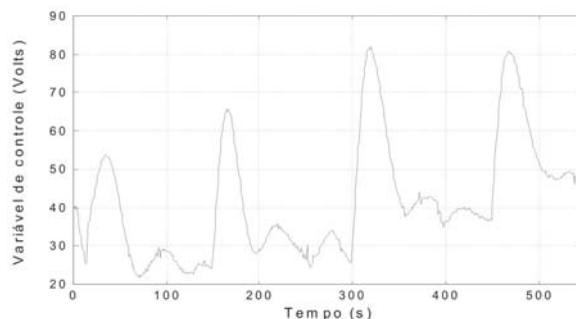


Figura 5 - Variável de controle do sistema sob ação do controlador GPC

Na Figura 6 mostra-se a evolução dos parâmetros estimados da planta, através do MQR, com fator de esquecimento igual a 0,99. Nota-se que no início do processo, estes oscilam, porque o MQR parte com valores nulos. A Figura 7, ilustra o erro de estimação, dado pela diferença entre a temperatura real do processo, durante o resfriamento do ar e a estimada pelo MQR. O máximo valor do erro de estimação é de 1,88 °C.

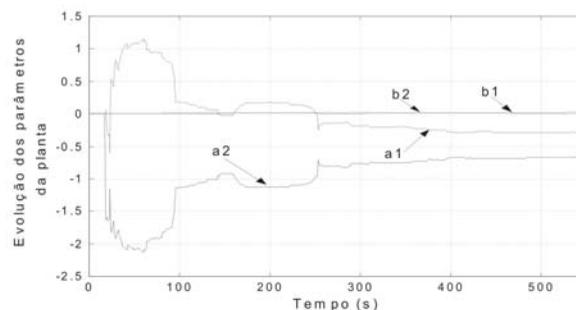


Figura 6 - Parâmetros estimados da planta

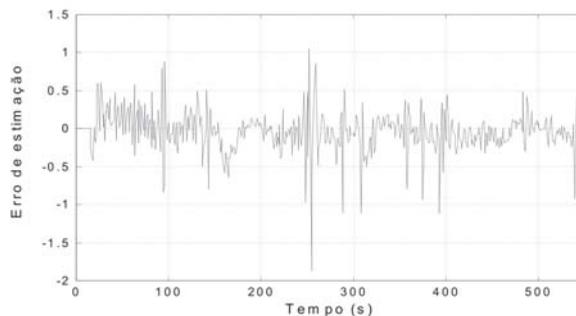


Figura 7 - Erro de estimação

A Figura 8 mostra para efeito de comparação, as respostas experimentais obtidas com λ igual a 0,1 e 0,15, usando a mesma trajetória de referência da Fig. 4. Nota - se, que a resposta obtida com fator de ponderação = 0,15, é mais lenta e menos oscilatória, que a obtida com $\lambda = 0,1$. O máximo valor do erro de estimação é de 1,66 °C.

A tabela 2 ilustra os parâmetros de desempenho do sistema, obtidos no experimento 2, considerando os fatores λ iguais a 1 e 0,15.

Tabela 2. Parâmetros de desempenho do experimento 2

Degrau de temperatura (°C)	51	46	41	38
Tempo de descida (s)	65,5	24	24	25
Sobre-sinal (%)	18,42	40	24	26,6
Tempo estabelecimento (s)	120	70	60	63

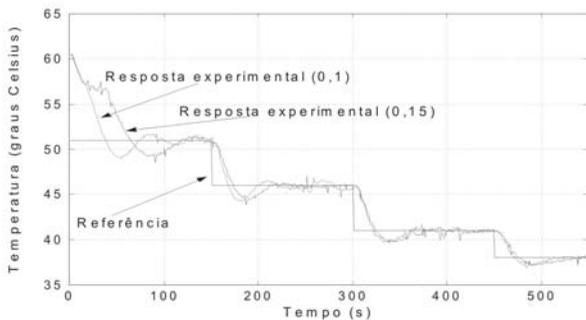


Figura 8 – Respostas experimentais do sistema, à uma sequência de degraus, sob ação do controlador GPC.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma implementação de um controlador GPC auto-ajustável em um túnel psicrométrico. O algoritmo utilizado no controlador adaptativo foi projetado pelo método explícito. Os parâmetros estimados do modelo matemático e do controlador foram calculados recursivamente em tempo real.

Os testes experimentais foram realizados utilizando λ iguais a 0,1 e 0,15. A comparação entre as respostas experimentais utilizando estes fatores de ponderação mostrou diferenças no regime transitório e não apresentou em ambos os casos erro em regime permanente. Para o fator $\lambda = 0,15$, a resposta mostrou-se mais lenta e menos oscilatória.

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. & Wittenmark, B., 1995. Adaptive Control. Editora Addison Wesley, Segunda edição

Camacho, E.F & 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 nº 02.

Coelho, A.A.R.; Coelho, L.S. 2004; Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares, 1ª Edição Florianópolis: UFSC. 2004.

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, Espanha.