

## **CONTROLADOR ADAPTATIVO APLICADO EM UM ROBÔ MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE CARTESIANO**

**Anrafel S. Meira<sup>a</sup>, Oldineia B. Souza<sup>a</sup>, Frederico A. M. Vale<sup>b</sup> e José A. Riul<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil, <http://www.ct.ufpb.br/ppgem/portal/>*

<sup>b</sup>*Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil, <http://www.ct.ufpb.br/departamentos/dtm/>*

**Palavras Chave:** Robótica, Identificação de Sistemas, Controle Adaptativo.

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é projetar controladores adaptativos de Dahlin Variância Mínima (DMV), combinado com o critério de Favier e Hassani, que inclui referências para os sinais de controle, para o controle de posição dos elos de um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade (3GDL). Os controladores são utilizados de forma adaptativa, onde os parâmetros do sistema são identificados em tempo real pelo método dos mínimos quadrados recursivos (MQR) e posteriormente utilizados no projeto dos controladores. O robô manipulador é composto basicamente por três válvulas eletropneumáticas e três cilindros pneumáticos. Resultados experimentais são apresentados, assim como a avaliação do desempenho obtido pelo robô manipulador.

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é projetar controladores adaptativos para um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade (3GDL) cartesiano. Os elos do robô manipulador são identificados em tempo real, pelo método dos mínimos quadrados recursivo (MQR) a partir de uma estrutura pré-definida para cada elo e os parâmetros obtidos são usados nos projetos dos controladores adaptativos. São projetados e implementados três controladores Dahlin Variância Mínima (DMV) com o critério de Favier e Hassani, para que o sistema atenda às especificações de desempenho impostas a ele considerando como referência uma sequência de pulsos para cada elo do robô.

Modelos caixa branca desse sistema são não lineares (Spong e Vidyasagar, 1989), enquanto que a identificação caixa preta, gera modelos lineares (Aguirre, 2007a; Åström e Wittenmark, 1995; Isermann, 1992), que podem ser usados para projeto e implementação de controladores adaptativos. Os modelos caixa branca, quando utilizados em projetos de controladores, exigem uma quantidade elevada de cálculos, o que torna necessário o uso de máquinas de grande porte, tendo em vista o esforço computacional requerido (Koivo e Guo, 1983). Na utilização de modelos caixa preta, suas estruturas são definidas a priori, e com isto, modelos de primeira ou segunda ordem, que representam bem os sistemas reais, e que requerem baixo esforço computacional, são empregados. Redes neurais artificiais (Haykin, 1994; Beale et al., 1991) também são utilizadas na identificação de sistemas, bem como no controle (Miller III et al., 1995) desses; porém o uso dessas depende de treinamentos, para posterior uso em controle em tempo real, o que as colocam em desvantagem quando comparadas com as técnicas paramétricas de identificação.

Controle Adaptativo é particularmente interessante para sistemas cujos parâmetros da planta são desconhecidos ou variam com o tempo (Aguirre, 2007a). O primeiro trabalho teórico mais relevante de controle adaptativo foi obtido por Åström e Wittenmark (1973) mostrando o algoritmo de Variância Mínima (MV) de forma mais detalhada. Posteriormente vários trabalhos importantes foram realizados tentando melhorar as deficiências do controlador de Åström; tais como o controlador de Variância Mínima Generalizada (GMV) de Clarke e Gawthrop (1975) e o controlador de Dahlin Variância Mínima (DMV) de Al-Chalabi e Khalil (1994). Vaz (1999), faz uma revisão desses controladores adaptativos e sugere novas alternativas na implementação deles como a utilização do critério de Favier e Hassani para o controlador DMV.

## 2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O robô manipulador conforme mostrado na Figura 1 é composto por três elos prismáticos coincidentes com um sistema de coordenadas cartesiano dado pelos eixos X, Y e Z. Cada elo prismático é um cilindro pneumático de dupla ação, com haste simples. Os elos X e Z têm curso de 400 mm e o elo Y tem curso de 200 mm, e são montados de tal forma que o elo Z translada os dois outros elos e que o elo X

translada o elo Y, gerando assim um espaço de trabalho para o órgão efetuator igual a um paralelepípedo. Para o acionamento dos cilindros pneumáticos são utilizadas três válvulas eletropneumáticas proporcionais de 5/3 vias. As válvulas são alimentadas por uma tensão de 24 VDC e recebem sinais analógicos de excitação variando de 0 à 5 VDC que servem para posicionar o carretel do êmbolo da válvula e assim controlar o fluxo de ar comprimido proveniente de um compressor. Três réguas potenciométricas são utilizadas para medir as posições das hastes dos cilindros pneumáticos. Um computador (Genuine Intel 1,60 GHZ, 960MB de RAM) é utilizado para enviar os sinais de acionamento das válvulas e receber os sinais das réguas potenciométricas. A comunicação do robô com o computador, é realizada através de duas placas de entrada e saída de dados e de um programa computacional, elaborado nas plataformas LabVIEW e Matlab.

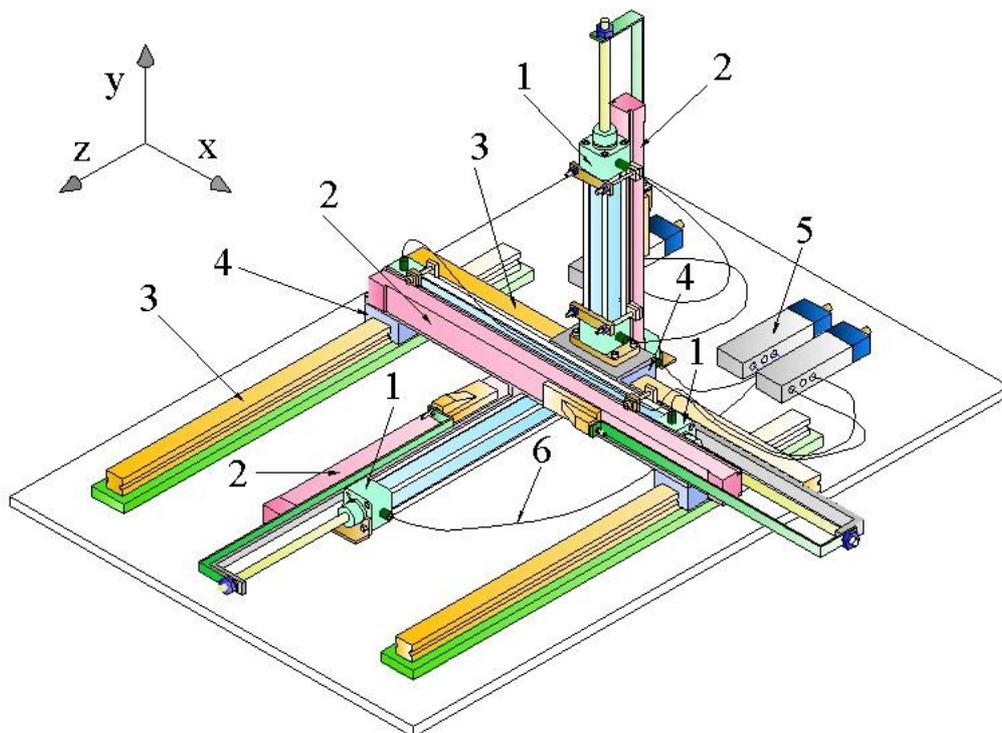


Figura 1: Manipulador Cartesiano formado por: (1) cilindros pneumáticos; (2) réguas potenciométricas; (3) guias; (4) patins de esferas; (5) válvulas eletropneumáticas proporcionais; (6) dutos de condução de ar comprimido

### 3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO ROBÔ

Modelos de sistemas são obtidos usando-se as leis físicas (modelos caixa branca) ou usando-se dados de entrada e saída dos sistemas (modelos caixa preta). A identificação tipo caixa preta é utilizada na modelagem do robô manipulador sob análise, tendo em vista sua utilização posterior no projeto e implementação dos controladores adaptativos. O estimador dos mínimos quadrados manipula medidas de entrada/saída de um sistema nas formas não-iterativa e iterativa através de

algoritmos não-recursivo e recursivo. Para a implementação de controladores adaptativos precisa-se que os parâmetros sejam estimados a cada período de amostragem, sendo então utilizado o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), mostrado a seguir. Para um sistema físico de uma entrada e uma saída (SISO – single input single out) e com uma perturbação, a equação a diferenças (Åström e Wittenmark, 1995; Aguirre, 2007b) é da forma:

$$\rho(k) = \varphi^T(k-1)\theta(k) - e(k) \quad (1)$$

sendo:

$$\theta^T(k) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad \dots \quad \dots] \quad (2)$$

$$\varphi^T(k) = [-\rho(k-1) \quad -\rho(k-2) \quad \dots \quad \dots] \quad (3)$$

onde:  $\rho(k)$  – saída do sistema;  $u(k)$  – entrada do sistema;  $\varphi^T(k-1)$  – vetor de medidas;  $\theta(k)$  – vetor de parâmetros do sistema;  $e(k)$  – ruído branco;  $a_i$  – pólos do sistema;  $b_j$  – zeros do sistema;  $n_a$  – número de pólos do sistema;  $n_b$  – número de zeros do sistema;  $d$  – número de atrasos do sistema.

O estimador dos mínimos quadrados recursivo (MQR) é implementado utilizando um fator de esquecimento  $\lambda$ . O conjunto de equações que compõe esse algoritmo de estimação é dado por (Aguirre, 2007b):

$$K(k) = \frac{P(k)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k)\varphi(k)} \quad (4)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \{ \rho(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \} \quad (5)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \{ P(k-1) - K(k)\varphi^T(k)P(k-1) \} \quad (6)$$

onde:  $K(k)$  é o ganho do estimador;  $\hat{\theta}(k)$  é o vetor de parâmetros estimados;  $P(k)$  é matriz de covariância do estimador.

#### 4 CONTROLE ADAPTATIVO

Controle adaptativo é definido como sendo um controlador com parâmetros ajustáveis com um mecanismo de ajuste (Åström e Wittenmark, 1995). Sendo apresentados na literatura diferentes enfoques para o mesmo, porém os mais utilizados são (Aguirre, 2007a) o de Escalonamento de Ganho (GS – Gain Schedule), Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC – Model-Reference Adaptive Control) e Regulador Auto-Sintonizado (STR – Self-Tuning Regulator). Neste trabalho é utilizado um controlador STR dado pela técnica de controle auto-ajustável de Dahlin Variância Mínima com o critério de Favier e Hassani descrita a seguir.

A técnica de controle auto-ajustável de Dahlin Variância Mínima (DMV) proposta por Al-Chalabi e Khalil (1994) consiste em combinar o controlador de Dahlin com a estratégia de variância mínima utilizando o modelo auto-regressivo de média móvel e entradas exógenas (ARMAX – autoregressive moving average with exogenous

inputs) dado pela Eq. (7):

$$\rho(k) = \frac{1}{A(z^{-1})} \left[ z^{-d} B(z^{-1}) u(k) + C(z^{-1}) e(k) \right] \quad (7)$$

onde:  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  e  $C(z^{-1})$  polinômios em  $z^{-1}$ . dados da seguinte forma:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots \quad (8)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 + b_2 z^{-1} + \dots \quad (9)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots \quad (10)$$

A equação da dinâmica do sistema em malha fechada da estratégia de variância mínima para esse modelo é dada pela Eq. (11) (Al-Chalabi e Khalil 1994):

$$\rho(k) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \rho(k) \right] + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) \quad (11)$$

onde:  $w(k)$  é a referência a ser seguida e  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$  são polinômios em  $z^{-1}$  dados da seguinte forma (Wellstead e Zarrop, 1991):

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \dots \quad (12)$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots \quad (13)$$

$$n_g = \text{máximo}(n_a - 1, n_c - d) \quad (14)$$

Os parâmetros  $f_i$  e  $g_j$  dos polinômios  $F(z^{-1})$  e  $G(z^{-1})$  são obtidos da seguinte identidade polinomial:

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (15)$$

A função de transferência em malha fechada do controlador de Dahlin é dada pela Eq. (16) (Vaz, 1999):

$$G_{MF}(z^{-1}) = \frac{(1-p)z^{-d}}{1-pz^{-1}} \quad (16)$$

onde:  $p$  é o parâmetro de Dahlin que varia entre 0 e 1, sendo que o sistema será mais rápido para valores tendendo a 0 e mais lento pra valores tendendo a 1.

A equação de síntese em malha aberta equivalente para o controlador de Dahlin é (Zafirou e Morari, 1985):

$$D_0(z^{-1}) = \frac{1}{G_0(z^{-1})} \frac{(1-p)z^{-d}}{1-pz^{-1}} \quad (17)$$

onde:  $G_0$  é a função de transferência do sistema a ser controlado.

A combinação do controlador de Dahlin com a estratégia de variância mínima consiste em colocar o controlador de Dahlin em série com o sistema em malha fechada da estratégia de variância mínima dado pela Eq. (11). Simplificando então a Eq. (11) com a Eq. (15) e desprezando o ruído branco chega-se que:

$$G_0(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})F(z^{-1})}{C(z^{-1})} \quad (18)$$

Substituindo a Eq. (18) na Eq.(17):

$$D_0(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \quad (19)$$

onde:

$$X(z^{-1}) = \frac{(1-p)}{1-pz^{-1}} \quad (20)$$

O controlador DMV é mostrado na Figura 2 e a lei de controle é dada pela Eq. (21):

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} \rho(k) \right] \quad (21)$$

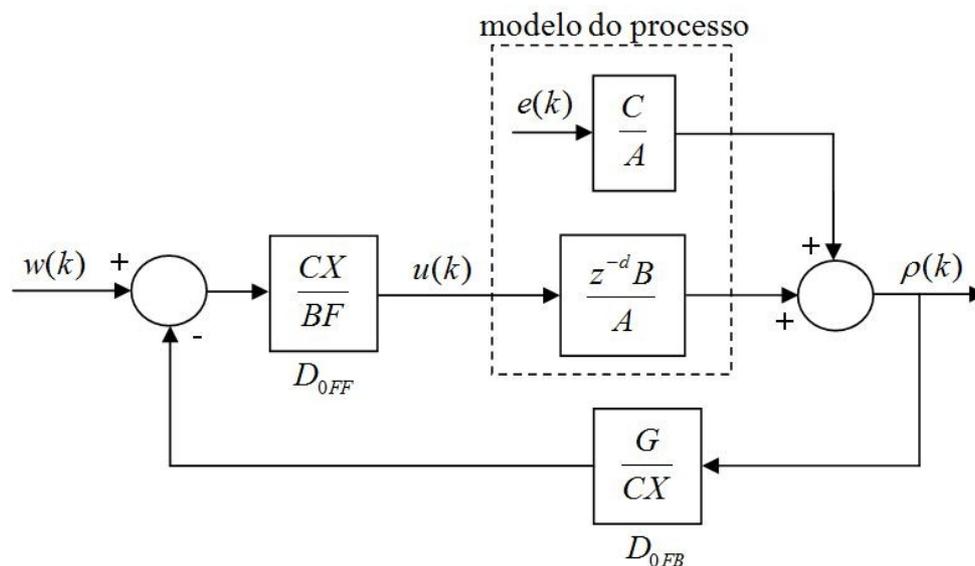


Figura 2: Controlador DMV

A lei de controle dada pela Eq.(21) não é aplicada em sistemas de fase não mínima, pois envolve cancelamento dos zeros do sistema com os pólos do controlador, levando o sistema a instabilidade. . Al-Chalabi e Khalil (1994) alteraram a lei de controle dada pela Eq.(21) adicionando o termo  $C(z^{-1})Q(z^{-1})$  no bloco direto do controlador que agora é dado por:

$$D_{0FF}(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (22)$$

onde:  $Q(z^{-1})$  é um polinômio de projeto em  $z^{-1}$ .

Para compensar essa alteração é adicionada uma função de transferência suplementar  $G_S(z^{-1})$  ao sinal de saída do modelo do sistema:

$$G_S(z^{-1}) = z^{-d} \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} \quad (23)$$

A lei de controle modificada para tratar de sistemas de fase não mínima é dada pela Eq.(24):

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} \rho(k) \right] \quad (24)$$

Vaz (1999) combina o controlador DMV com o critério de Favier e Hassani, que consiste em inserir uma referência para o sinal de controle, tratando a saída como uma saída generalizada do sistema dada pela Eq. (25) (ver Figura 3):

$$A(z^{-1})\rho(k) = z^{-d} \left\{ \left[ B(z^{-1}) + \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} \right] u(k) - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} u_r(k) \right\} + C(z^{-1})e(k) \quad (25)$$

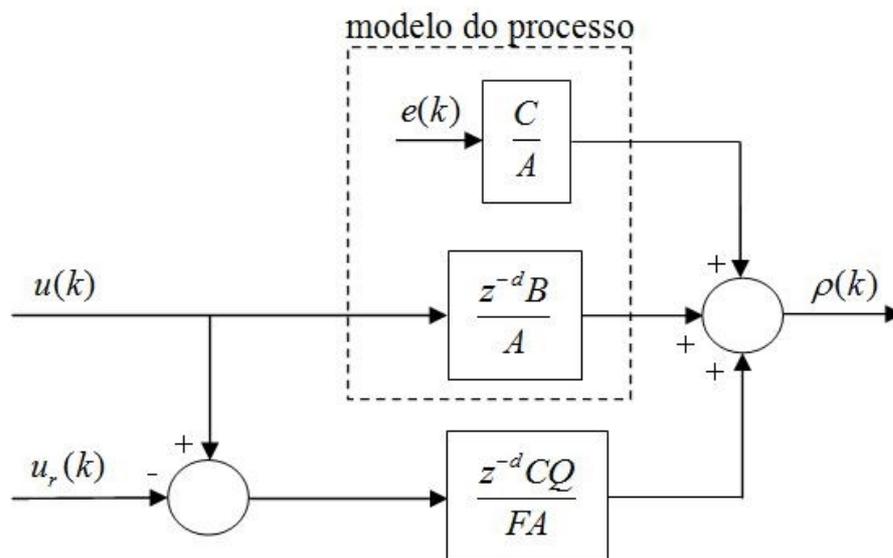


Figura 3: Sistema generalizado para o controlador DMV com o critério de Favier e Hassani

A lei de controle do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani é dada pela minimização da função custo:

$$J = E \left\{ \left[ \rho(k+d) - X(z^{-1})w(k) \right]^2 \right\} \quad (26)$$

Minimizando a função custo dada pela Eq.(26) chega-se a lei de controle do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani:

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})u_r(k) - G(z^{-1})\rho(k) + C(z^{-1})X(z^{-1})w(k)}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (27)$$

Fazendo  $u_r(k) = 0$  na Eq. (27) chega-se a lei de controle do controlador DMV modificada para tratar de sistemas de fase não mínima dada pela Eq. (24).

Para determinar uma expressão para a referência do sinal de controle, utiliza-se a idéia básica proposta por Favier e Hassani (Vaz, 1999): a referência para o controle deve ser determinada de tal forma que garanta que a saída do sistema original convirja para referência se o sinal de controle convergir para sua referência. Supondo

que essa teoria seja verdadeira, então em regime permanente  $u(k)$  tende para  $u_r(k)$ , bem como  $\rho(k)$  tende para  $w(k)$ . Sendo assim podem-se igualar estas variáveis na Eq. (27) em condições de regime permanente resultando na seguinte expressão para referência da variável de controle:

$$u_r(k) = \frac{C(1) - G(1)}{B(1)F(1)} w(k) \quad (28)$$

## 5 PROJETO DO CONTROLADOR DMV COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI PARA O ROBÔ

Como os movimentos dos elos robô são desacoplados, então a identificação é realizada de forma independente para cada elo, sendo projetados três controladores DMV com o critério de Favier e Hassani; um para cada elo. A seguir são mostradas as equações utilizadas no controlador com um sub-índice  $\rho$  que é igual a  $x$  para direção do elo X,  $y$  para a direção do elo Y e  $z$  para a direção do elo Z. Considerando os elos do robô representados pelo modelo ARX com estrutura pré-definida para cada elo: dois pólos, um zero e um atraso de transporte; então o vetor de parâmetros dos elos é dado pela Eq. (29):

$$\hat{\theta}_\rho = [\hat{a}_{1\rho} \quad \hat{a}_{2\rho} \quad \hat{b}_{1\rho} \quad \hat{b}_{2\rho}]^T \quad (29)$$

Para o modelo ARX com a estrutura escolhida para representar o sistema tem-se:

$$A_\rho(z^{-1}) = 1 + \hat{a}_{1\rho}z^{-1} + \hat{a}_{2\rho}z^{-2} \quad (30)$$

$$B_\rho(z^{-1}) = \hat{b}_{1\rho} + \hat{b}_{2\rho}z^{-1} \quad (31)$$

$$C_\rho(z^{-1}) = 1 \quad (32)$$

$$F_\rho(z^{-1}) = 1 \quad (33)$$

$$G_\rho(z^{-1}) = g_{0\rho} + g_{1\rho}z^{-1} \quad (34)$$

Substituindo a Eq. (30), Eq. (32), Eq. (33) e Eq. (34) na Eq.(15) chega-se que:

$$g_{0\rho} = -\hat{a}_{1\rho} \quad (35)$$

$$g_{1\rho} = -\hat{a}_{2\rho} \quad (36)$$

Substituindo a Eq. (20), Eq. (31), Eq. (32), Eq. (33) e Eq. (34) na Eq.( 27) considerando o polinômio de projeto  $Q_\rho(z^{-1}) = q_{0\rho} + q_{0\rho}z^{-1}$  chega-se a lei de controle DMV com critério de Favier e Hassani para os elos do robô:

$$\begin{aligned}
u_{\rho}(k) = \frac{1}{\hat{b}_{1\rho} + q_{0\rho}} & \left\{ (1 - p_{\rho})w(k) - g_{0\rho}\rho(k) - (g_{1\rho} - g_{0\rho}p_{\rho})\rho(k-1) + g_{1\rho}p_{\rho}\rho(k-2) - \right. \\
& - \left[ \hat{b}_{2\rho} + q_{1\rho} - p_{\rho}(\hat{b}_{1\rho} + q_{0\rho}) \right] u_{\rho}(k-1) + p_{\rho}(\hat{b}_{2\rho} + q_{1\rho})u_{\rho}(k-2) + q_{0\rho}u_{r\rho}(k) + \\
& \left. + (q_{1\rho} - q_{0\rho}p_{\rho})u_r(k-1) - q_{1\rho}p_{\rho}u_r(k-2) \right\} \quad (37)
\end{aligned}$$

onde:  $u_{\rho}(k)$  – representa as variáveis de controle dos elos do robô manipulador nas direções x, z e y indicadas pelo sub-índice  $\rho$ ;  $\rho(k)$  – respostas dos elos do robô nas direções x, z e y.

Utilizando as equações da Eq. (31) a Eq. (34) na Eq.(28) chega-se a referência para os elos do robô:

$$u_{r\rho}(k) = \frac{1 - g_{0\rho} - g_{1\rho}}{\hat{b}_{0\rho} + \hat{b}_{1\rho}} w_{\rho}(k) \quad (38)$$

O controlador DMV com o critério de Favier e Hassani é implementado no robô manipulador de 3 GDL através de um programa computacional desenvolvido nas plataformas LabVIEW e Matlab, funcionando da seguinte forma: as três válvulas eletropneumáticas excitam os três elos do robô e suas posições são medidas. De posse desses dados: excitações das válvulas  $u_x(k)$ ,  $u_z(k)$  e  $u_y(k)$  e as repostas medidas  $x(k)$ ,  $z(k)$  e  $y(k)$ , que são as posições das hastes dos cilindros pneumáticos, o MQR estima os parâmetros dos três elos utilizando a Eq. (5) sendo eles atualizados a cada período de amostragem pelas Eq. (4) e Eq. (6), em seguida os parâmetros estimados são utilizados nos projetos dos três controladores usando-se os parâmetros dados pelas Eq. (35) e Eq.(36) e a referência para a variável de controle dada pela Eq. (38). Finalizando, os controladores são implementados conforme Eq.(37).

## 6 RESULTADOS

Na realização dos experimentos utilizou-se um tempo de amostragem  $T_s = 200$  ms, considerou-se: como referências, três seqüências de pulsos, valores iniciais nulos para os parâmetros dos três elos, fator de esquecimento  $\lambda = 1$ , controladores proporcionais do início até 0,8 segundo do experimento com ganhos  $k_{px} = k_{pz} = k_{py} = 0,23$  e após este tempo os controladores adaptativos foram ativados com os polinômios de ponderação dados na Tabela 1. Como especificação de desempenho para os três elos do robô manipulador fixou-se: sobre-sinal de 15% e erro em regime permanente de  $\pm 5\%$  depois do primeiro pulso.

	Elo X	Elo Z	Elo Y
$p$	0,75	0,75	0,85
$q_0$	0,8	0,9	0,85
$q_1$	0	0	0

Tabela 1: Polinômios de Ponderação usados nos controladores adaptativos do robô

As Figura 4, Figura 5 e Figura 6 mostram as referências e as respostas reais obtidas para cada elo de robô.

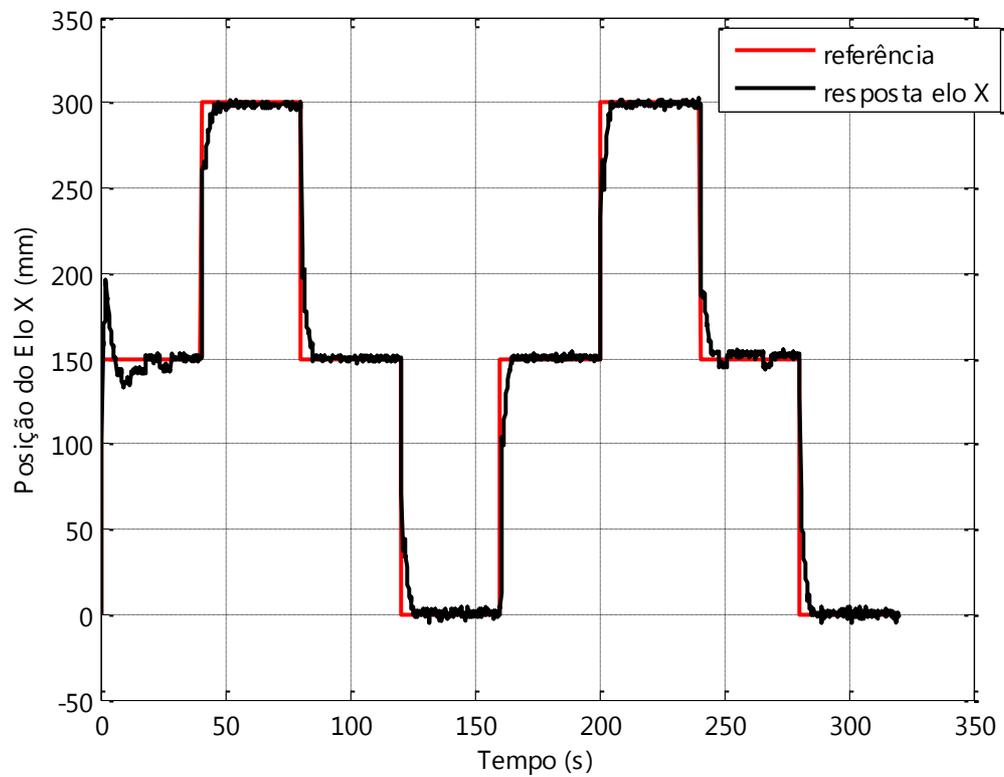


Figura 4: Referência e resposta real do elo X do robô

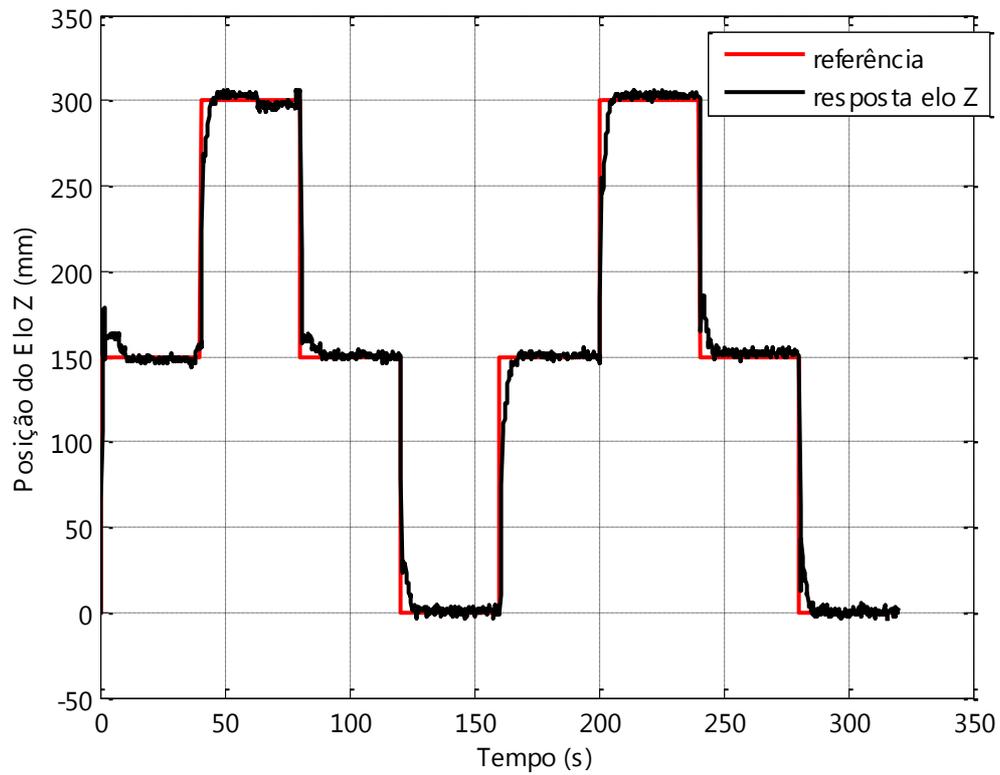


Figura 5: Referência e resposta real do elo Z do robô

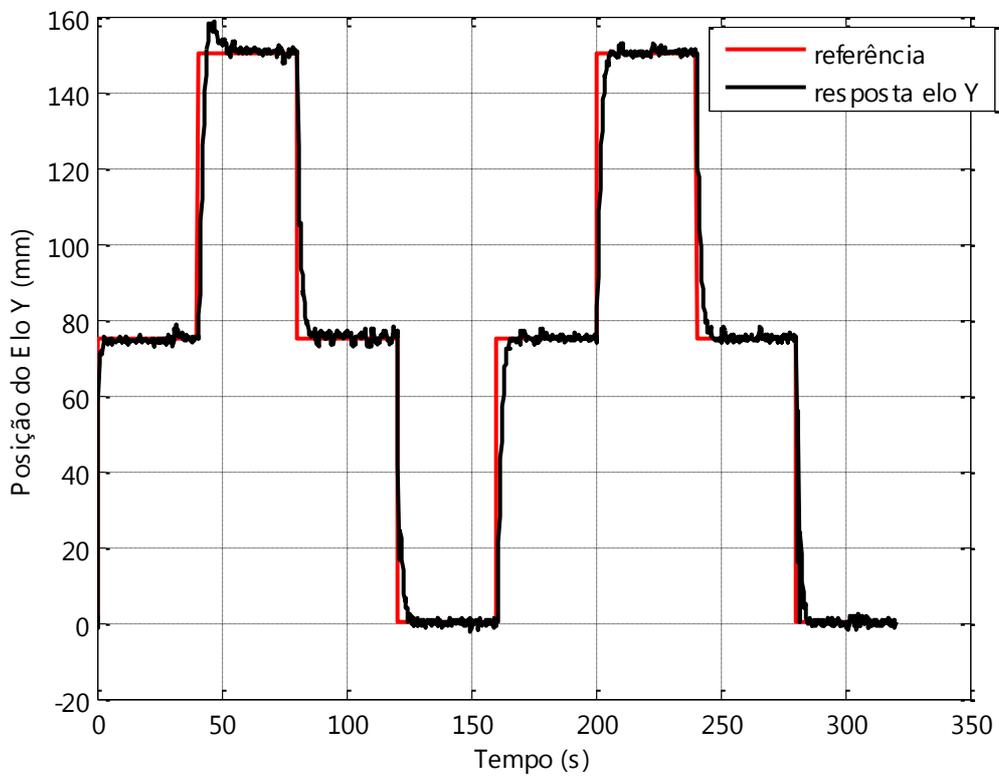


Figura 6: Referência e resposta real do elo Y do robô

As [Figura 7](#), [Figura 8](#) e [Figura 9](#) mostram os erros de saída entre as referências e as respostas reais do sistema ao longo do tempo.

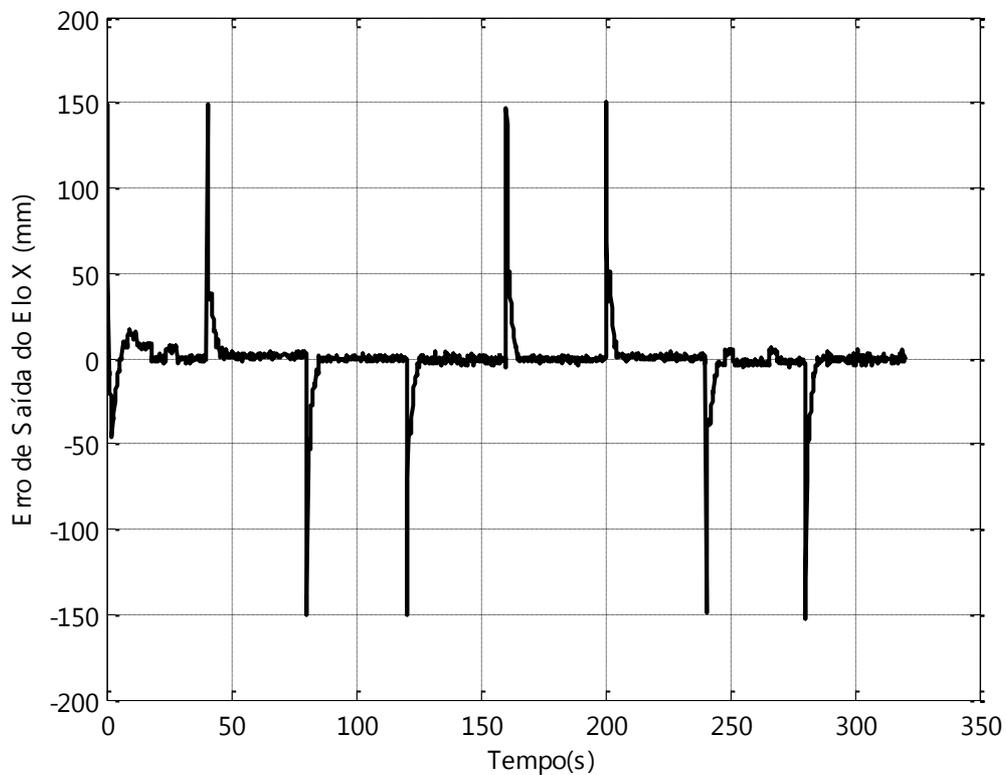


Figura 7: Erro de saída do elo X do robô

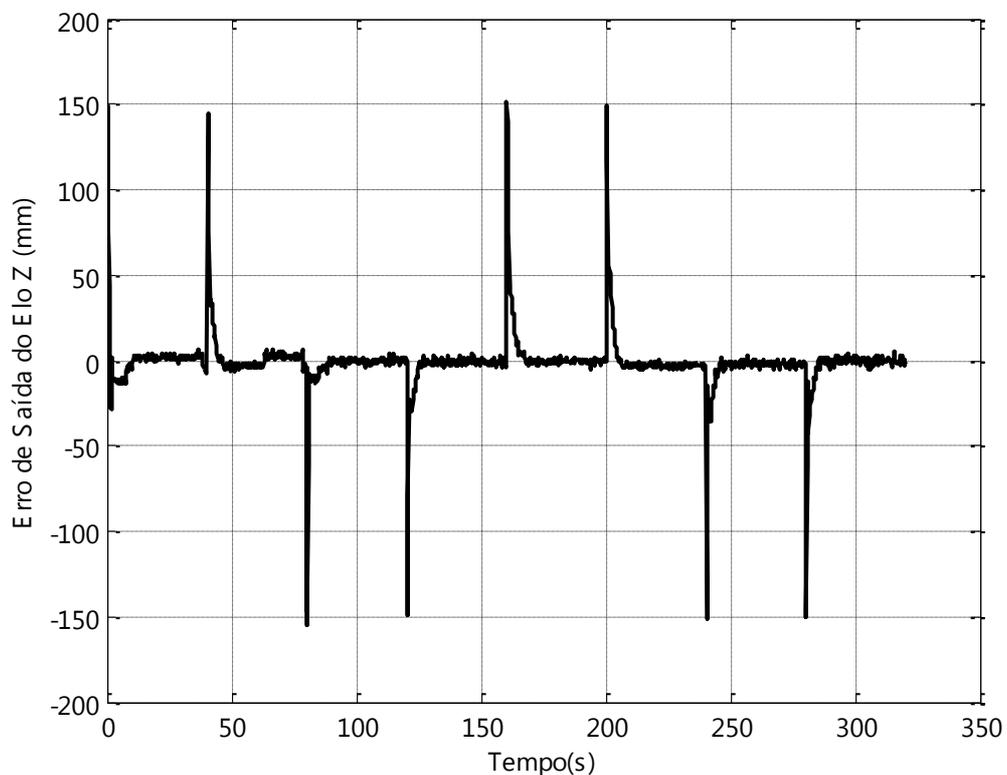


Figura 8: Erro de saída do elo Z do robô

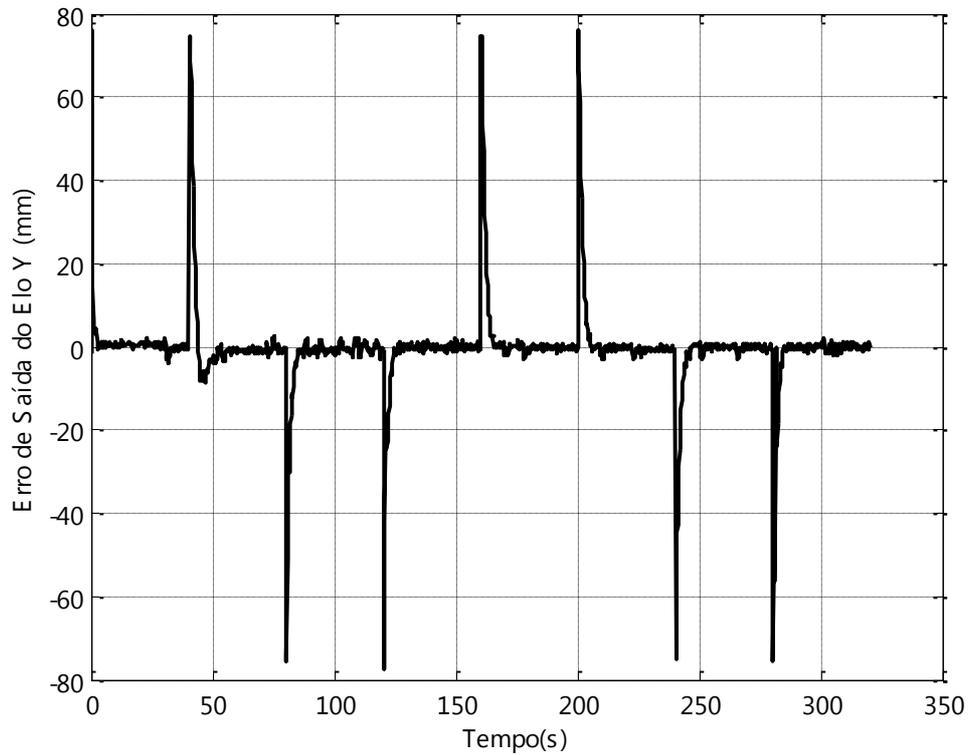


Figura 9: Erro de saída do elo Y do robô

As [Figura 10](#), [Figura 11](#) e [Figura 12](#) mostram as variáveis de controle dos elos ao longo do tempo.

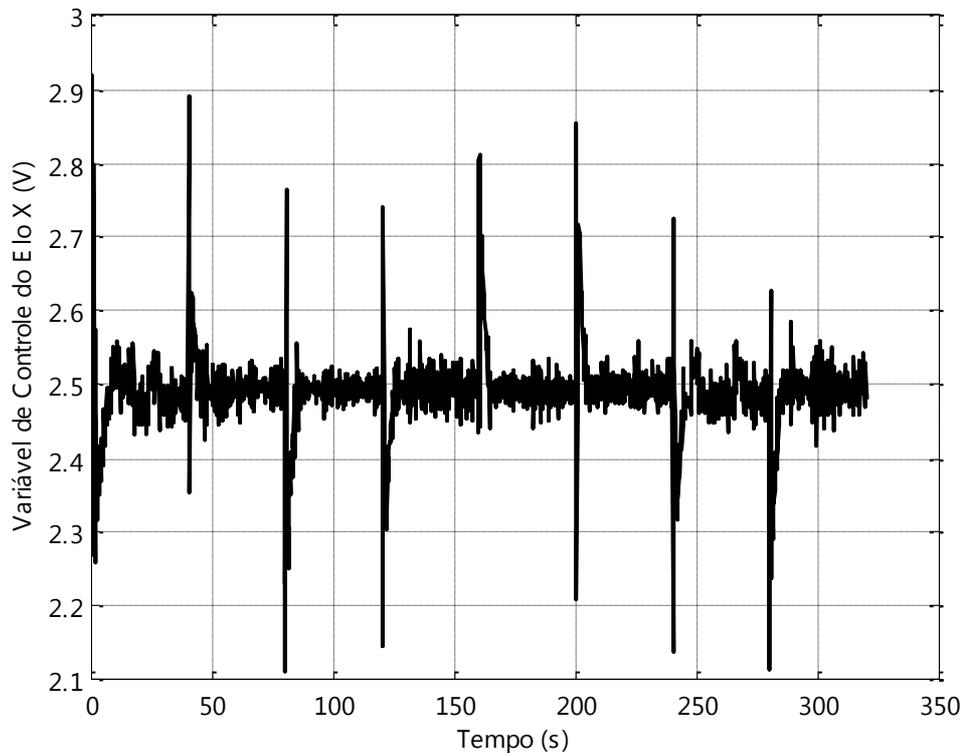


Figura 10: Variável de controle do elo X do robô

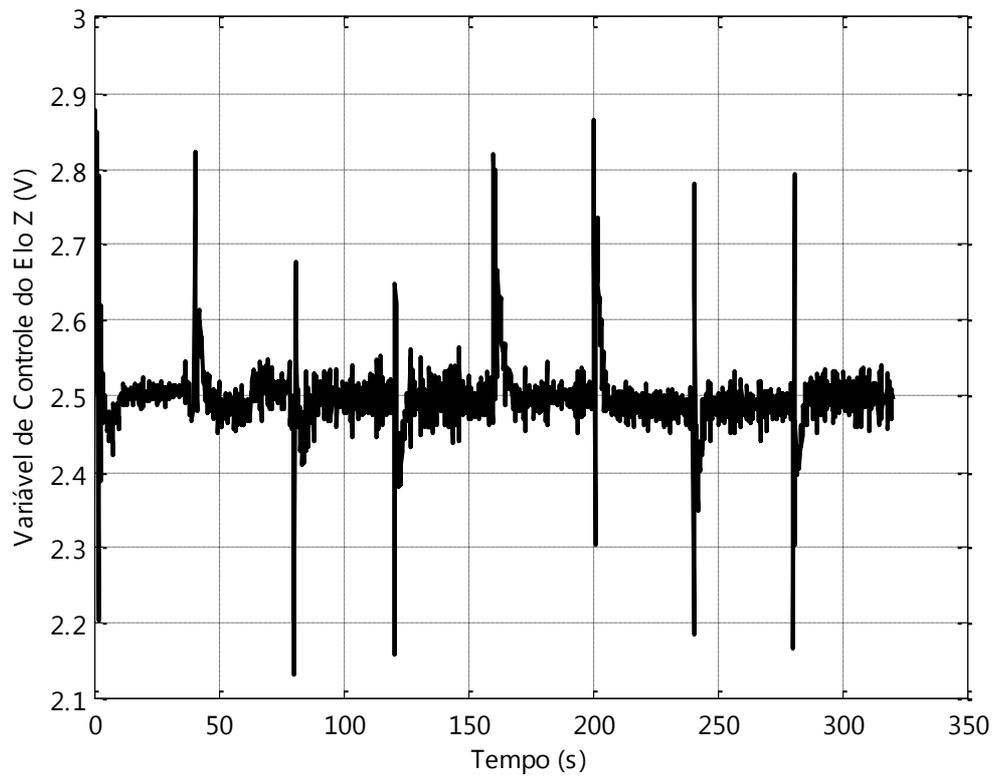


Figura 11: Variável de controle do elo Z do robô

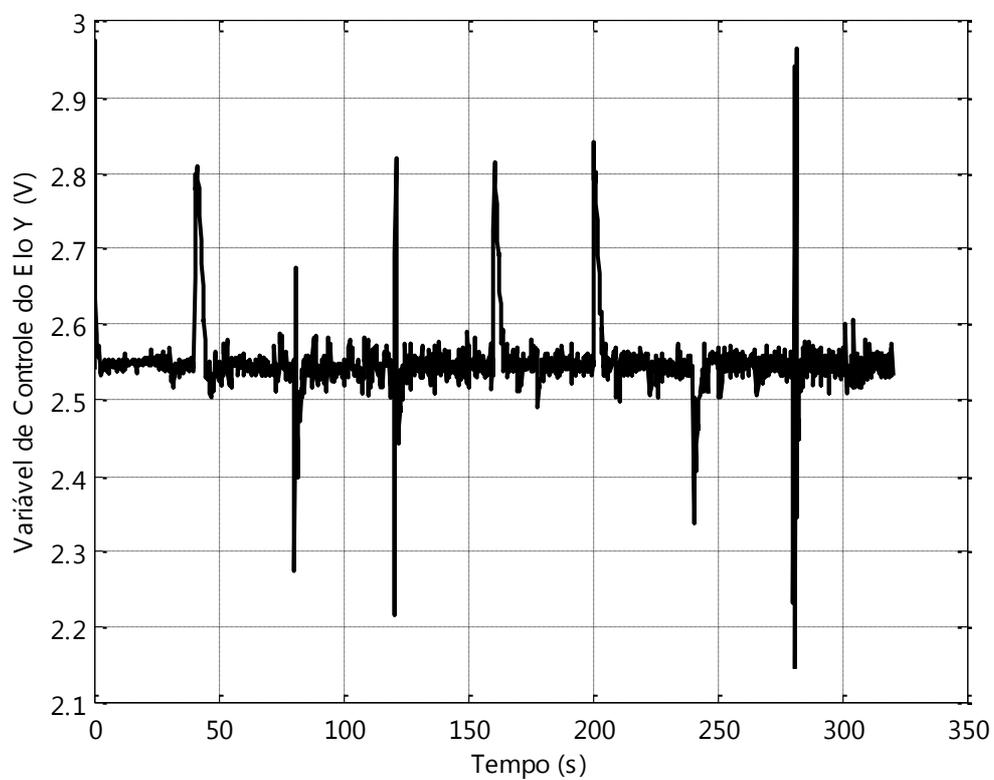


Figura 12: Variável de controle do elo Y do robô

As [Figura 13](#), [Figura 14](#) e [Figura 15](#) mostram os parâmetros estimados dos elos do robô ao longo do tempo.

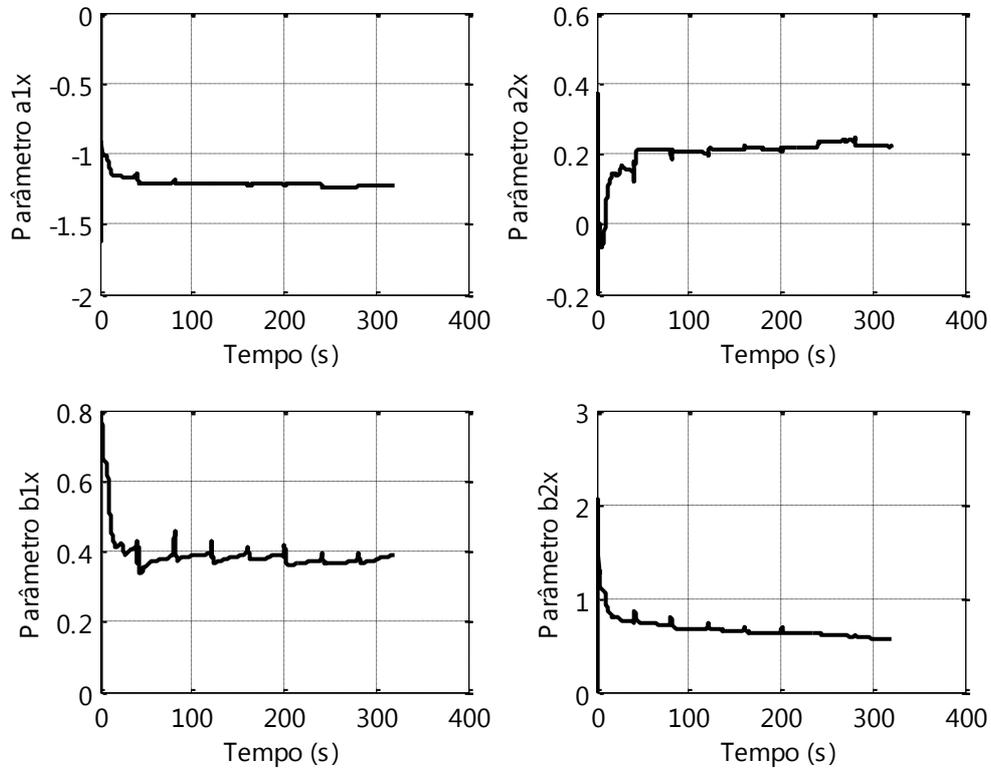


Figura 13: Parâmetros estimados do elo X do robô

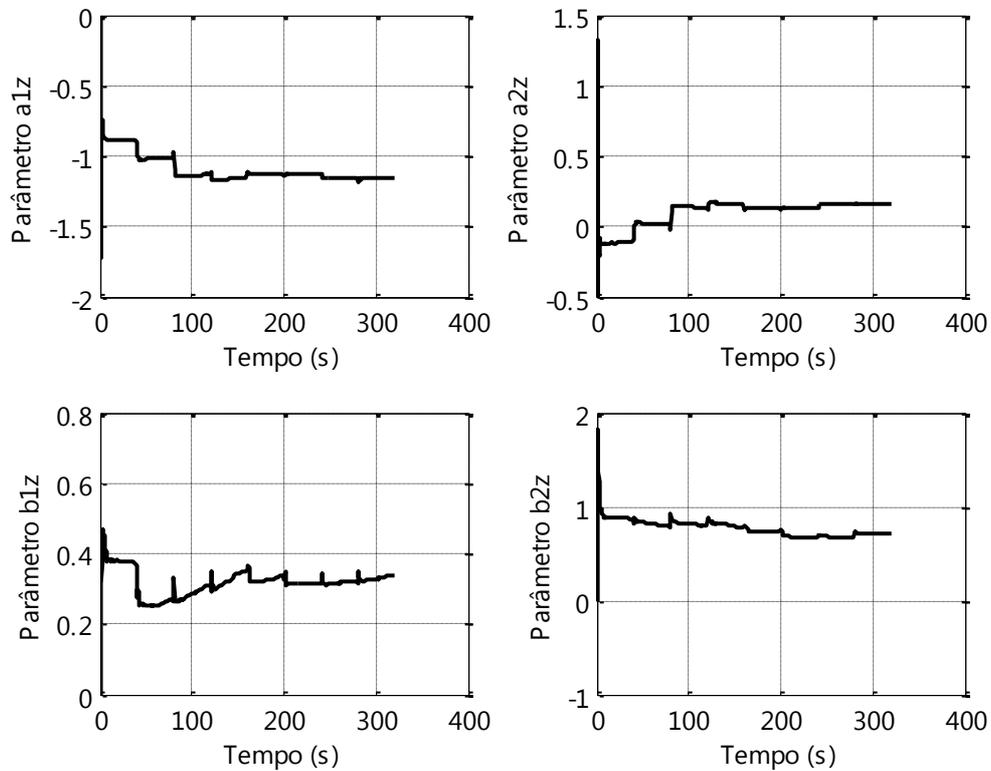


Figura 14: Parâmetros estimados do elo Z do robô

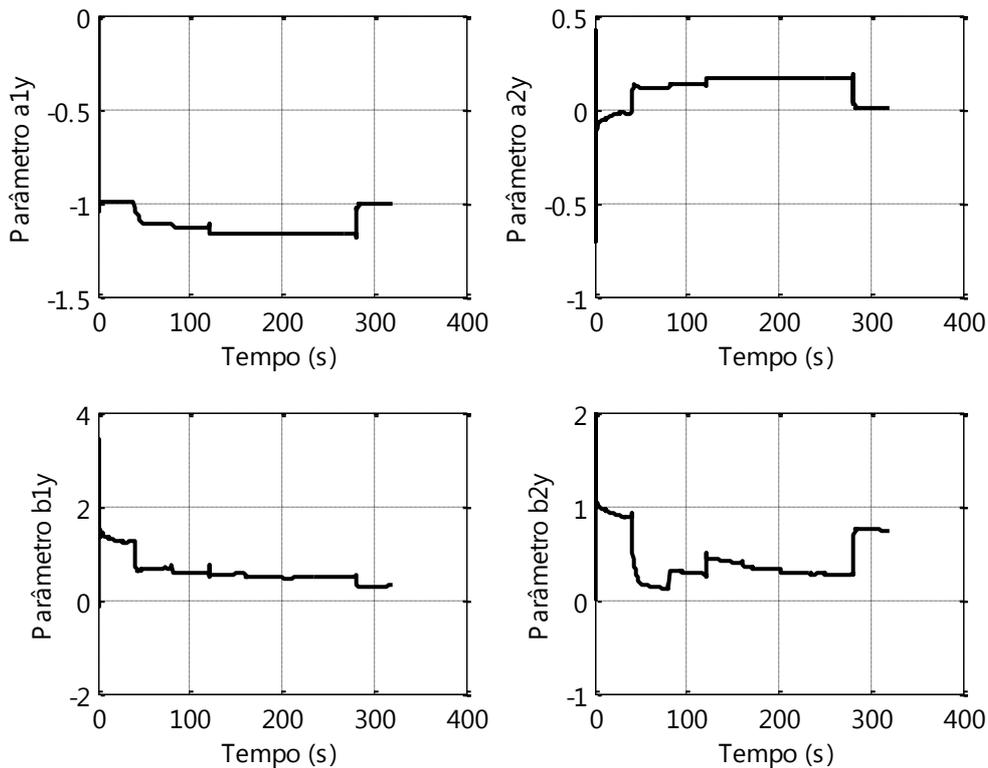


Figura 15: Parâmetros estimados do elo Y do robô

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o projeto e a implementação de controladores DMV com o critério de Favier e Hassani em um robô manipulador de 3 GDL cartesiano, acionado por sistemas eletropneumáticos. Os resultados experimentais obtidos atenderam as especificações de desempenho impostas ao sistema, ou seja, não ocorreu sobre-sinal acima de 15% e nem erro em regime permanente acima de 5% a partir do segundo pulso o que mostra que os controladores adaptativos projetados foram satisfatórios para o seguimento das referências utilizadas.

## REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (Ed.), *Enciclopédia de Automática: Controle & Automação*, volume II, 1ª edição. Blucher, São Paulo/SP, 2007a.
- Aguirre, L.A., *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais*, 3ª edição. Editora UFMG, Belo Horizonte/MG, 2007b.
- Al-Chalabi, L.A., Khalil, F.F., Dahlin Minimum Variance Self-Tuning Controller, *International Journal of Control*, 60(5), 1994.
- Åström, K.J., e Wittenmark, B., *Adaptive Control*. Addison Wesley. 2ª Edição, 1995.
- Åström, K.J., Wittenmark, B., On Self Tuning Regulator. *Automatica*, 9, 1973.
- Beale, R., Jackson, T., *Neural Computing: An Introduction*. Adam Hilger, New York, 1991.

- Clarke, D.W, Gawthrop, P.G., Self-Tuning Controller. *Proc. IEE*, 122(6), 1975.
- Haykin, S., *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*, Macmillan, New York. AC-28, pp. 162-171, 1994.
- Isermann, R., Lachman, K. H., Matko, D., *Adaptive Control Systems*. Prentice Hall, 1992.
- Koivo A. J., e Guo T., Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulator. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1983.
- Miller III, W. T., Sutton, R. S., Werbos, P. J., *Neural Networks for Control*. The MIT Press, London, 1995.
- Spong, M.W., e Vidyasagar M., *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, New York, 1989.
- Vaz, G. L. F., *Controladores Adaptativos de Variância Mínima e Dahlin: Uma Revisão e Novas Concepções de Projeto*, Dissertação M.Sc., UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
- Wellstead, P.E., Zarrop, M.B., *Self-Tuning Systems: Control and Signal Processing*. John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- Zafirou, E., Morari, M., Digital Controllers for SISO Systems: a Review and a New Algorithm. *International Journal of Control*, 42(4), 1985.