

## **CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO EM DOIS ELOS DE UM ROBÔ MANIPULADOR ELETROMECAÂNICO DE CINCO GRAUS DE LIBERDADE**

**Carlos R. A. Pinto<sup>a</sup>. José A. Riul<sup>b</sup>,  
Paulo H. de M. Montenegro<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, e-mail: carlosrobertopinto@gmail.com*

*<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, e-mail: riul@ct.ufpb.br , paulo@ct.ufpb.br*

**Palavras chaves:** Robótica, Identificação, Controle Adaptativo

**Resumo.** O objetivo do presente trabalho é projetar controladores adaptativos para dois elos de um robô manipulador eletromecânico de cinco graus de liberdade (5 GDL). O robô manipulador é composto por cinco juntas rotacionais, por quatro elos e por uma garra. Cinco motores de corrente contínua são utilizados para o acionamento do robô e a transmissão do movimento dos motores para as juntas é realizada através de trens de engrenagens. As medidas das posições angulares das juntas são realizadas por potenciômetros. Modelos de robôs manipuladores são obtidos usando equações de Newton – Euler ou de Lagrange; e são acoplados e não lineares. Neste trabalho, o modelo dos elos do robô manipulador é obtido em tempo real, para cada período de amostragem. Os parâmetros dos elos a serem controlados, são identificados pelo método dos mínimos quadrados recursivo (MQR), em função de dados dos elos e são usados nos projetos dos controladores adaptativos, para o controle das posições das juntas dos elos em análise. Finalizando, são apresentados resultados experimentais como avaliação do desempenho obtido pelos elos controlados do robô.

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo controlar a posição, através de técnica adaptativa, de dois elos de um robô manipulador eletromecânico de cinco graus de liberdade (5 GDL). Os elos 1 e 2 a serem controlados são mostrados na [Figura 1](#). O modelo matemático de um sistema pode ser obtido através de leis físicas, conhecido como modelo caixa branca ou por técnica de identificação paramétrica, conhecida como modelo caixa preta, que depende de dados reais do sistema.

Modelos caixa branca de robôs manipuladores são não lineares ([Spong e Vidyasagar, 1989](#); [Craig, 1988](#)), enquanto que a identificação caixa preta, gera modelos lineares ([Aguirre, 2007](#)), ([Astrom & Wittenmark, 1995](#)), ([Isermann, 1992](#)), que podem ser usados para projeto e implementação de controladores adaptativos. Os modelos são obtidos em tempo real, e representam de forma satisfatória a dinâmica não linear do sistema, visto que esta é avaliada para cada instante de tempo, em função do tempo de amostragem utilizado. 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, a escolha de modelos de primeira ou segunda ordem, que representam bem os sistemas reais, e que requerem baixo esforço computacional, são empregados. Como a dinâmica dos elos do robô é acoplada, não linear e com parâmetros variantes no tempo, os controladores adaptativos são empregados, visando um bom desempenho para o sistema, dado que são obtidos à cada período de amostragem e em tempo real.

Neste trabalho, o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos (MQR) é utilizado, em tempo real, na obtenção dos parâmetros dos dois elos do robô em análise, e estes são usados nos projetos e nas implementações dos controladores adaptativos DMV – Al-Chalabi e Khalil, dos elos, visando o controle de suas posições angulares. A identificação dos elos é realizada considerando o acoplamento entre eles, porém os controladores adaptativos projetados não levam em consideração tal acoplamento. Finalizando, são apresentados resultados experimentais mostrando o desempenho obtido para os dois elos do robô, diante das especificações de desempenho impostas.

## 2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O Robô Manipulador, mostrado na [Figura 1](#) é um robô didático, pesando aproximadamente 7 kg, referência RD5NT, fabricado pela empresa Didacta Itália, é composto de cinco juntas rotativas, quatro elos e uma garra. A primeira junta rotativa refere-se ao movimento angular da base, com deslocamento máximo de  $293^\circ$ , a segunda junta rotativa refere-se ao ombro, com deslocamento angular máximo de  $107^\circ$ , a terceira junta rotativa refere-se ao cotovelo, com deslocamento angular máximo de  $284^\circ$  e a quarta junta rotativa refere-se ao pulso com deslocamento angular máximo de  $360^\circ$ . Os elos do robô manipulador representam o tronco, o braço, o antebraço e o punho. A garra tem curso máximo de 22 mm, capacidade de fixação de 350 gramas e parada automática por meio de uma micro chave operando com velocidade de fechamento ajustável. A transmissão de cada movimento é feita por meio de bloco motor-reductor, com dois estágios de redução, e com relação de transmissão total de 1/500. Os motores dos blocos são de corrente contínua, referência 2139.906-22.112-050, fabricados pela Maxon Motor, com potencia de 2,5 watts e com capacitor de longa vida. A voltagem nominal dos motores CC é de 12 volts e a rotação máxima sem carga é de 6480 rpm. A reprodução dos deslocamentos angulares das juntas e movimento da garra é assegurada por meio de

potenciômetros rotativos lineares, referência 78CSB502, fabricados pela Sfernice, com resistência de 5 k $\Omega$ .

Um computador HP compaq com processador AMD Athlon dual core de 985 Mhz e 786 MB de RAM é utilizado para enviar comando de acionamento aos motores CC e receber os sinais dos sensores potenciométricos. A comunicação do robô com o computador, é realizada através de duas placas de entrada e saída de dados, NI USB-6009 e de um programa computacional nas plataformas LabView e Matlab. Considerando as características de tensão e capacidade máxima de corrente das placas de entrada e saída de dados, houve a necessidade de introdução de um amplificador de potência para servir como fonte de suprimento aos motores de corrente contínua do robô manipulador. Este amplificador além de fornecer a potência necessária ao acionamento de cada motor, fornece a polaridade adequada para que o seu funcionamento se dê no sentido desejado. A decisão do sentido de rotação depende da tensão de excitação aplicada em seus terminais de entrada.

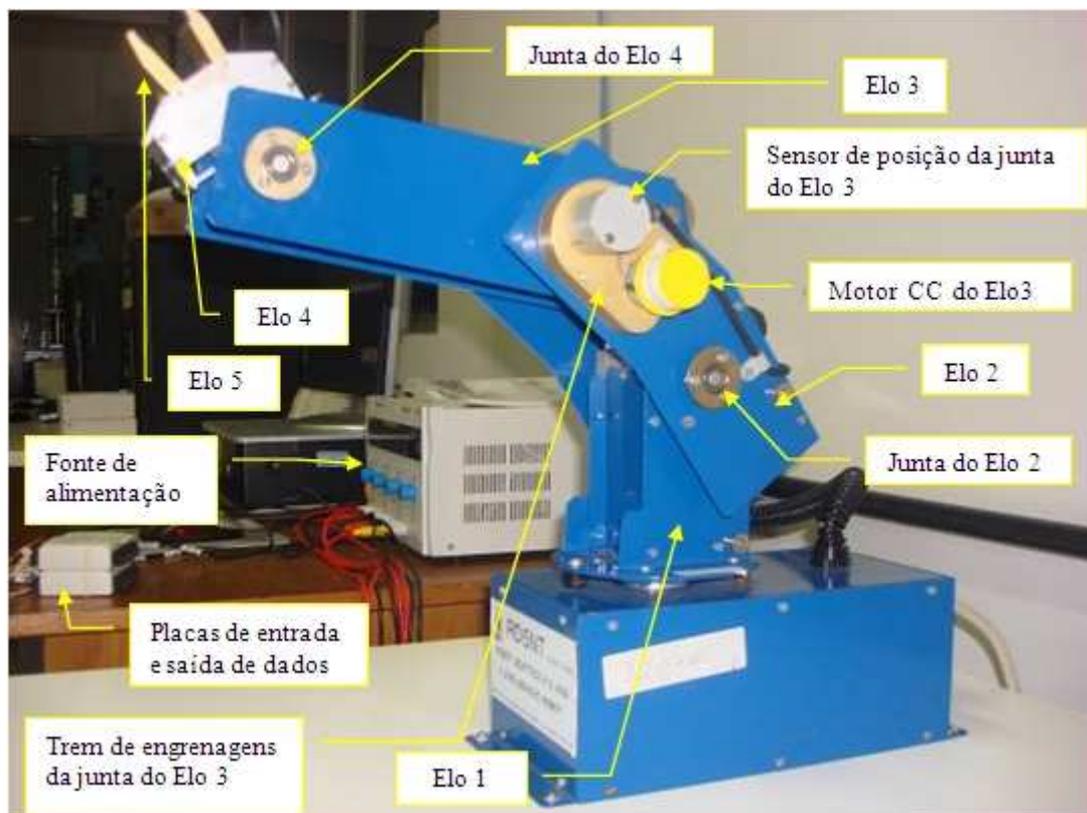


Figura 1: Robô Manipulador de 5 GDL

### 3 IDENTIFICAÇÃO DOS DOIS ELOS DO ROBÔ MANIPULADOR

A identificação de sistemas é uma área do conhecimento que estuda técnicas alternativas de modelagem matemática. Uma das características dessas técnicas é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário e, conseqüentemente, tais métodos são referidos como modelagem (ou identificação) caixa preta ou modelagem empírica (Aguirre, 2007). A identificação tipo caixa preta é utilizada no modelamento de dois elos do robô manipulador sob análise, através do algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), e em tempo real, conforme Eq. (1).

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + K(t+1)\varepsilon(t+1) \quad (1)$$

onde:

$$K(t+1) = \frac{P(t)\varphi(t+1)}{\lambda + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (2)$$

$$P(t+1) = \frac{1}{\lambda} \left\{ P(t) - \frac{P(t)\varphi(t+1)\varphi^T(t+1)P(t)}{\lambda + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \right\} \quad (3)$$

$K(t+1)$  - ganho do estimador com fator de esquecimento  $\lambda$ ;

$P(t)$  - matriz de covariância com fator de esquecimento;

$\hat{\theta}(t+1)$  - vetor de parâmetros estimados pelo MQR;

$\varepsilon(t+1) = v(t+1) - \hat{v}(t)$  - erro de previsão;

$v(t+1)$  - saída do sistema;

$\hat{v}(t+1)$  - saída estimada do sistema;

$t = kT_s$  - tempo discreto;

$k = 1, 2, 3, \dots, N$  - número de amostras;

$T_s$  - tempo de amostragem.

O robô manipulador de 5 GDL é articulado, como mostrado na [Figura 1](#), então a dinâmica dos elos é acoplada, e a identificação é realizada considerando o acoplamento dinâmico entre os elos e a pré-estrutura de cada elo como abaixo:

- Pré-Estrutura de segunda ordem (dois pólos, um zero e um atraso de transporte)

$$\hat{\theta}_1 = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4] \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_2 = [a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ b_5 \ b_6 \ b_7 \ b_8] \quad (5)$$

com o vetor de medidas, dado por (6).

$$\varphi^T(t-1) = [-\beta_1(t-1) \ -\beta_1(t-2) \ -\beta_2(t-1) \ -\beta_2(t-2) \ u_1(t-1) \ u_1(t-2) \ u_2(t-1) \ u_2(t-2)] \quad (6)$$

As respostas estimadas  $\hat{\beta}_1(t)$  e  $\hat{\beta}_2(t)$  são obtidas pela Eq. (7) e pela Eq. (8), respectivamente.

$$\hat{\beta}_1(t) = \varphi^T(t-1)\hat{\theta}_1(t) \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_2(t) = \varphi^T(t-1)\hat{\theta}_2(t) \quad (8)$$

A pré-estrutura dos modelos dos elos foi escolhida após processo de identificação dos elos, em malha aberta, variando-se o número de pólos, o número de zeros e de atrasos de transporte dos elos.

#### 4 CONTROLADOR ADAPTATIVO

[Aström e Wittenmark \(1995\)](#) definem um controlador adaptativo como sendo um controlador com parâmetros ajustáveis e um mecanismo de ajuste. O controlador auto-ajustável (STR) 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 pela solução de um projeto que utiliza os parâmetros estimados do sistema (planta). Um diagrama de blocos de um controlador STR é apresentado na [Figura 2](#). No diagrama de blocos destacam-se duas malhas fechadas. A malha inferior é constituída pelo sistema e pela realimentação de saída. Na malha superior destaca-se a

presença de três componentes: a estimação de parâmetros, o projeto do controlador e o controlador ajustável. O primeiro componente tem como função estimar os parâmetros da planta e para isto utiliza um estimador recursivo; o segundo constitui-se no mecanismo de adaptação cuja tarefa é executar em tempo real o projeto do controlador e o terceiro é um controlador com os parâmetros ajustáveis. O STR é muito flexível quanto a escolha do método de projeto do controlador e do algoritmo para estimação dos parâmetros do sistema. Os parâmetros estimados são considerados como se fossem os parâmetros reais do sistema; dessa forma, a estimação dos parâmetros é a essência do controlador adaptativo (Rúbio et al, 1996). Existem várias técnicas de controle adaptativo; dentre elas a de Variância Mínima (VM) e outras que adicionam outros elementos à ela, como descritas abaixo.

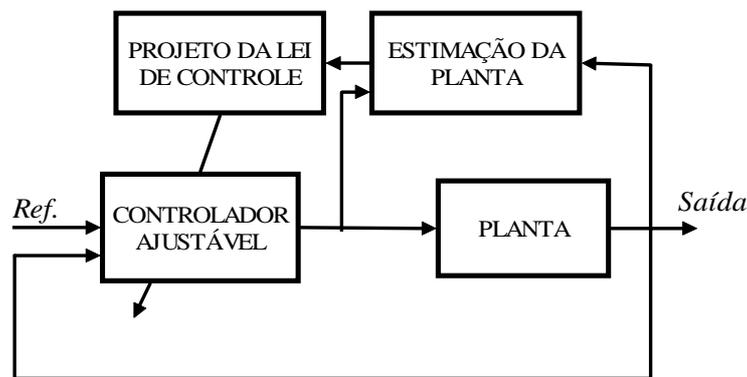


Figura 2: Diagrama de Blocos do Controlador STR e Planta

#### a) Controlador de Variância Mínima

Esse tipo de controle tem como objetivo minimizar a variância na saída de um sistema que é submetido a uma perturbação estocástica.

Considere o sistema descrito pelo modelo ARMAX (Modelo Auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas), com função de transferência discreta linear, conforme Eq. (9) (Aguirre, 2007; Coelho e Coelho, 2004 e Ljung, 1999).

$$A(z^{-1})v(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t) \quad (9)$$

onde:  $u(t)$  é a variável de controle,  $v(t)$  é a saída do sistema e  $e(t)$  representa um ruído branco filtrado incidente sobre o sistema. A formulação da Lei de controle pode ser expressa em termos de otimização da função custo dada por:

$$J = E[v^2(t+k)] \quad (10)$$

E, a Eq.(11) representa a lei de controle que minimiza a função custo dada pela Eq. (10) (Åstrom and Wittenmark, 1995).

$$u(t) = \frac{-G(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} v(t) \quad (11)$$

com:

$$\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} = F(z^{-1}) + Z^{-k} \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (12)$$

## b) Controlador DMV

O controlador Dahlin-Variância Mínima (DMV) combina o controlador de Dahlin com o controlador de Variância Mínima, conforme [Figura 3](#), cuja lei de controle é dada por:

$$u(t) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \left[ w(t) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} v(t) \right] \quad (13)$$

onde:

$$X(z^{-1}) = (1-p)/(1-pz^{-1}) \quad (14)$$

$$p = e^{-\lambda T_s} \quad ; \quad \lambda = 1/\tau \quad (15)$$

$\lambda$  - parâmetro de ajuste de Dahlin;

$\tau$  - constante de tempo do sistema;

$p$  - parâmetro de projeto;

$T_s$  - período de amostragem.

Quando  $\lambda$  tende a um valor muito alto,  $p$  se aproxima de zero e o controle é mais rápido, e para valores pequenos de  $\lambda$ ,  $p$  tende para a unidade e o controle é mais lento.

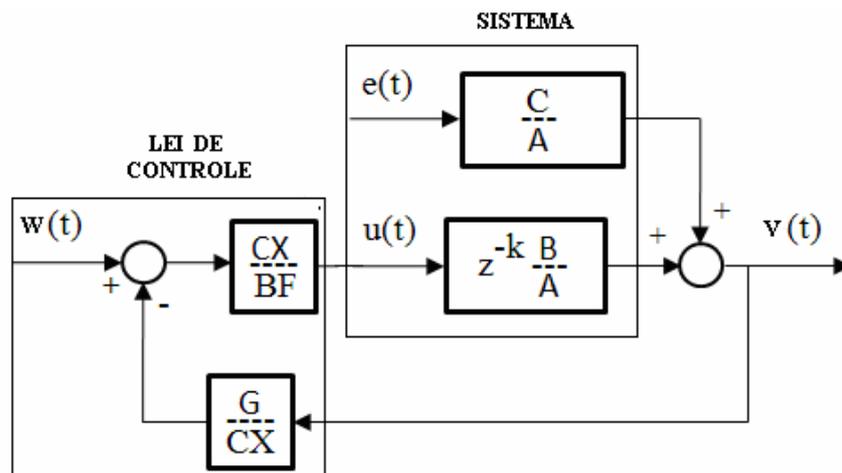


Figura 3: Estrutura do controlador DMV e Sistema

## c) Controlador DMV – Al-Chalabi e Khalil

Como a estrutura DMV não servia para controlar sistemas de fase não-mínima, [Al-Chalabi e Khalil \(1994\)](#) contornaram esta limitação com uma alteração, que consistia em adicionar uma parcela CQ no denominador do bloco direto do controlador. Dessa forma, a lei de controle DMV – Al-Chalabi e Khalil é dada pela Eq. (16) e representada na [Figura 4](#).

$$u(t) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \left[ w(t) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} v(t) \right] \quad (16)$$

onde: Q é um polinômio de projeto.

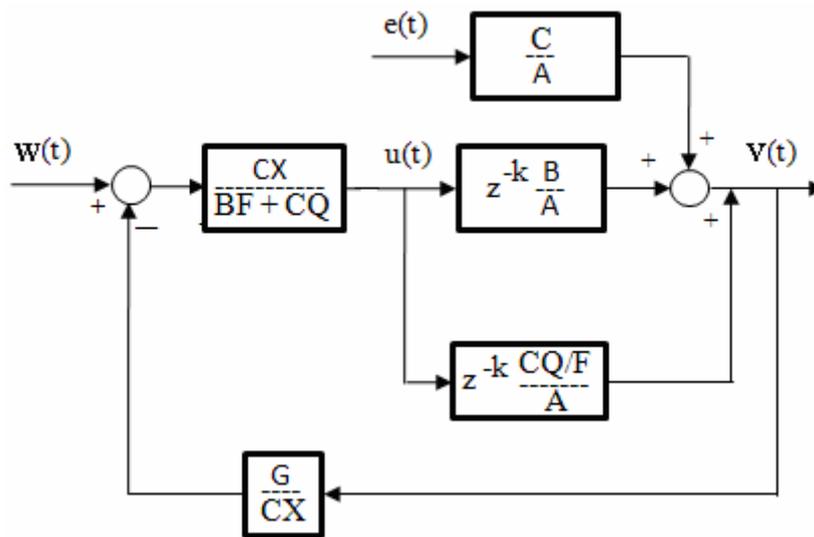


Figura 4: Estrutura do Controlador DMV – Al-Chalabi e Khalil

### 5 PROJETO DO CONTROLADOR DMV – AL-CHALABI E KHALIL PARA OS ELOS DO ROBÔ

Para obtenção das leis de controle para os elos 1 e 2 do robô manipulador, foi definida inicialmente a estrutura de cada elo do robô, através de um modelo ARX, com dois pólos, um zero e um atraso de transporte, conforme Eq. (17).

$$G_s(z^{-1}) = z^{-k} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{z^{-1}(b_0 + b_1z^{-1})}{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})} = \frac{(b_1z^{-1} + b_2z^{-2})}{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})} \quad (17)$$

Como o modelo é ARX, então:

$$C(z^{-1}) = 1 \quad (18)$$

E, conforme a identidade polinomial dada pela Eq. (12), e o número de pólos, zeros e atrasos de transporte, dos modelos dos dois elos do robô, tem-se:

$$F(z^{-1}) = 1 + f_0 \quad (19)$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} \quad (20)$$

Substituindo o polinômio  $A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$  da Eq. (17), e os polinômios  $C(z^{-1})$  da Eq. (18),  $F(z^{-1})$  da Eq. (19) e  $G(z^{-1})$  da Eq. (20) na identidade polinomial da Eq. (12), tem-se que:

$$1 = (1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})(1 + f_0) + z^{-1}(g_0 + g_1z^{-1}) \quad (21)$$

Resolvendo a Eq. (21), chega-se ao conjunto de parâmetros dado pela Eq. (22).

$$f_0 = 0 ; \quad g_0 = -a_1 ; \quad g_1 = -a_2 \quad (22)$$

Substituindo a Eq. (22) nas Eqs. (19) e (20), tem-se:

$$F(z^{-1}) = 1 \quad (23)$$

$$G(z^{-1}) = -a_1 - a_2z^{-1} \quad (24)$$

Considerando o polinômio  $Q$  de projeto como dado abaixo:

$$Q = q_0 + q_1 z^{-1} \quad (25)$$

E, substituindo  $X$  da Eq. (14), o polinômio  $B(z^{-1})$  da Eq. (17), e os polinômios  $C(z^{-1})$  da Eq. (18),  $F(z^{-1})$  da Eq. (19),  $G(z^{-1})$  da Eq. (20) e o polinômio  $Q(z^{-1})$  de projeto da Eq. (25), na lei de controle dada pela Eq. (16), obtém-se a lei de controle do controlador DMV – Al-Chalabi e Khalil, conforme Eq. (26).

$$u(t) = \frac{\frac{1-p}{1-pz^{-1}}}{(b_1 + b_2 z^{-1}) + (q_0 + q_1 z^{-1})} \left[ w(t) - \left( \frac{g_0 + g_1 z^{-1}}{\frac{1-p}{1-pz^{-1}}} \right) v(t) \right] \quad (26)$$

Da Eq. (26), obtém-se:

$$u(t) = \frac{1}{(b_1 + q_0)} [(-b_2 + q_1) + p(b_1 + q_0)]u(t-1) + p(b_2 + q_1)u(t-2) \\ + (1-p)w(t) - g_0 v(t) + (pg_0 - g_1)v(t-1) + pg_1 v(t-2) \quad (27)$$

A lei de controle dada pela Eq. (27) é para ser aplicada em um sistema SISO; para aplicá-la nos elos 1 e 2 do robô, que apresentam acoplamento dinâmico, conforme Eq. (4) e Eq. (5), torna-se necessário tratar os elos de forma desacoplada; e assim os parâmetros dos dois elos, a serem utilizados são representados pela Eq. (28) e pela Eq. (29).

$$\hat{\theta}_1 = [a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2] \quad (28)$$

$$\hat{\theta}_2 = [a_7 \ a_8 \ b_7 \ b_8] \quad (29)$$

Finalizando, a lei de controle do controlador DMV – Al-Chalabi e Khalil dada pela Eq. (27), adaptada conforme Eq. (28) e Eq. (29) para os elos 1 e 2 do robô manipulador assume as formas:

$$u_1(t) = \frac{1}{(b_1 + q_{01})} [(-b_2 + q_{11}) + p_1(b_1 + q_{01})]u_1(t-1) + p_1(b_2 + q_{11})u_1(t-2) \\ + (1-p_1)w_1(t) - g_{01}\beta_1(t) + (p_1g_{01} - g_{11})\beta_1(t-1) + p_1g_{11}\beta_1(t-2) \quad (30)$$

$$u_2(t) = \frac{1}{(b_7 + q_{02})} [(-b_8 + q_{12}) + p_2(b_7 + q_{02})]u_2(t-1) + p_2(b_8 + q_{12})u_2(t-2) \\ + (1-p_2)w_2(t) - g_{02}\beta_2(t) + (p_2g_{02} - g_{12})\beta_2(t-1) + p_2g_{12}\beta_2(t-2) \quad (31)$$

Usando as Eqs. (20) e (24), e conforme as Eqs. (28) e (29), tem-se:

$$G_1(z^{-1}) = g_{01} + g_{11}z^{-1} = -a_1 - a_2z^{-1} \quad (32)$$

$$G_2(z^{-1}) = g_{02} + g_{12}z^{-1} = -a_7 - a_8z^{-1} \quad (33)$$

E, usando a Eq. (25), tem-se:

$$Q_1 = q_{01} + q_{11}z^{-1} \ ; \ Q_2 = q_{02} + q_{12}z^{-1} \quad (34)$$

A sintonia dos parâmetros dos polinômios  $Q_1$  e  $Q_2$  de projeto e dos parâmetros de projeto  $p_I$  e

$p_2$ , é realizada através de variação dos mesmos de modo que as especificações de desempenho impostas aos elos sejam atendidas.

Para avaliação do desempenho obtido pelos elos do robô, utiliza-se o Erro Integral Absoluto (IAE), através da Eq. (35), que acumula de modo absoluto os erros de seguimento de trajetória dos elos 1 e 2. Quanto menor o valor deste índice, melhor o seguimento da trajetória.

$$IAE(v) = \sum_{j=k_{ini}}^{j=k_{fin}} |w_i(j) - v(j)| \quad (35)$$

onde:

$w_i(j)$ : referência do  $i$ -ésimo elo do robô, no instante de tempo  $j$ ;

$v(j)$ : posição do  $i$ -ésimo elo do robô no instante de tempo  $j$ ;

$k_{ini}$ ,  $k_{fin}$ : instantes de tempo inicial e final da trajetória em avaliação.

O algoritmo MQR de identificação dado pela Eq. (1) e as leis de controle (Eq.(30) e Eq. (31)) foram implementadas através de um programa computacional estruturado nas plataformas Matlab e LabView. Nos instantes iniciais do experimento, que correspondeu a  $t = 1,2$  s, utilizou-se controladores proporcionais no intuito de estimar parcialmente os parâmetros dos elos e evitar uma ação inadequada dos controladores adaptativos, uma vez que os parâmetros iniciais dos elos têm valores nulos. Após este tempo inicial, foram automaticamente acionados os controladores adaptativos. O tempo de amostragem  $T_s$  utilizado, foi determinado conforme Aguirre (2007.a).

A Tabela 1 mostra os parâmetros de inicialização do processo de estimação e de controle, utilizados nos elos 1 e 2 do robô manipulador.

Parâmetros	Elo 1	Elo 2
Vetor $\theta(0)$	0	0
Matriz $P(0)$	$10^4 * I$	$10^4 * I$
Fator de Esquecimento ( $\lambda$ )	0,97	0,97
Ganho proporcional ( $k_p$ )	0,4	0,4
Tempo de amostragem (t (ms))	120	120
Parâmetro ( $p$ )	0,1	0,7
Polinômio (Q)	$0,19 - 0,1z^{-1}$	$0,2 - 0,1z^{-1}$

Tabela 1: Parâmetros de inicialização do Programa Computacional

A Tabela 2 estabelece as especificações de desempenho impostas ao sistema.

Parâmetros	Elo 1	Elo 2
Erro em regime	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Máximo sobre-sinal	$Mp \leq 15\%$	$Mp \leq 15\%$
Tempo de estabilização (s)	6	6

Tabela 2: Especificações de Desempenho Impostas ao Sistema

## 6 RESULTADOS

Na realização dos experimentos, utilizou-se como referências dos elos 1 e 2 do robô, as seqüências de pulsos mostradas nas Figuras 5 e 6, que mostram também as saídas reais e as saídas estimadas dos dois elos do robô, respectivamente. O sistema funciona da seguinte

forma: As posições angulares  $\beta_1(t)$  e  $\beta_2(t)$  dos dois elos são medidas através dos potenciômetros; os parâmetros dos elos são identificados pelo MQR através do programa computacional implementado; os erros de saída são obtidos, e as variáveis de controle  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  são determinadas, através dos controladores adaptativos projetados e implementados, e enviadas aos motores CC, que acionam as juntas dos elos. As Figuras 7 e 8 mostram os erros de saída dos elos 1 e 2, e as Figuras 9 e 10 mostram os erros de estimação dos elos 1 e 2. Nas Figuras 11 e 12 são mostradas as variáveis de controle dos elos e nas Figuras 13 e 14 são mostrados os parâmetros dos elos 1 e 2 utilizados nas leis de controle. Observa-se através das Figuras 5 e 6 que as saídas reais e estimadas dos elos 1 e 2, atenderam as especificações de desempenho impostas, conforme Tabela 2; e assim sendo, com os controladores projetados e implementados, tarefas realizadas pelo robô, dentro dessas especificações, serão totalmente satisfatórias. O máximo valor de erro de saída em regime, encontrado para os elos, conforme Figuras 7 e 8 ficou abaixo de 4 % e o máximo sobre sinal ficou abaixo de 10%. Conforme as Figuras 9 e 10 que mostram os erros de estimação, verifica-se que os parâmetros estimados dos elos, para a pré-estrutura definida, através do MQR, representam bem o sistema para os objetivos aqui usados, que foram os projetos dos controladores.

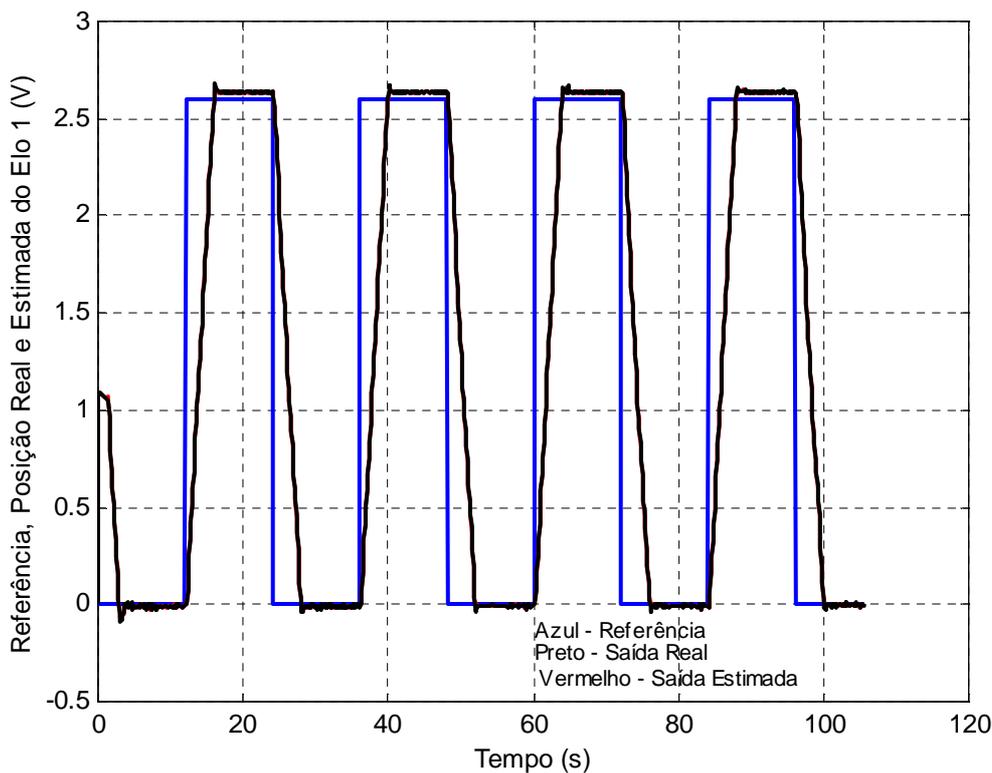


Figura 5: Referência, Saídas Real e Estimada do Elo 1 do Robô Manipulador

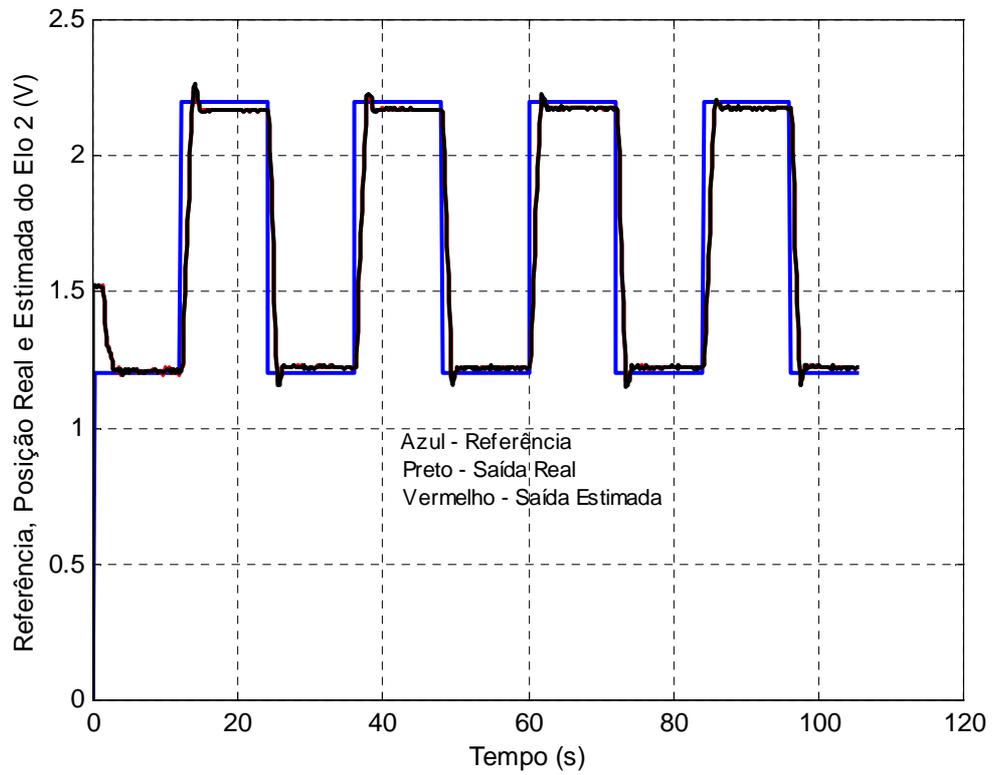


Figura 6: Referência, Saídas Real e Estimada do Elo 2 do Robô Manipulador

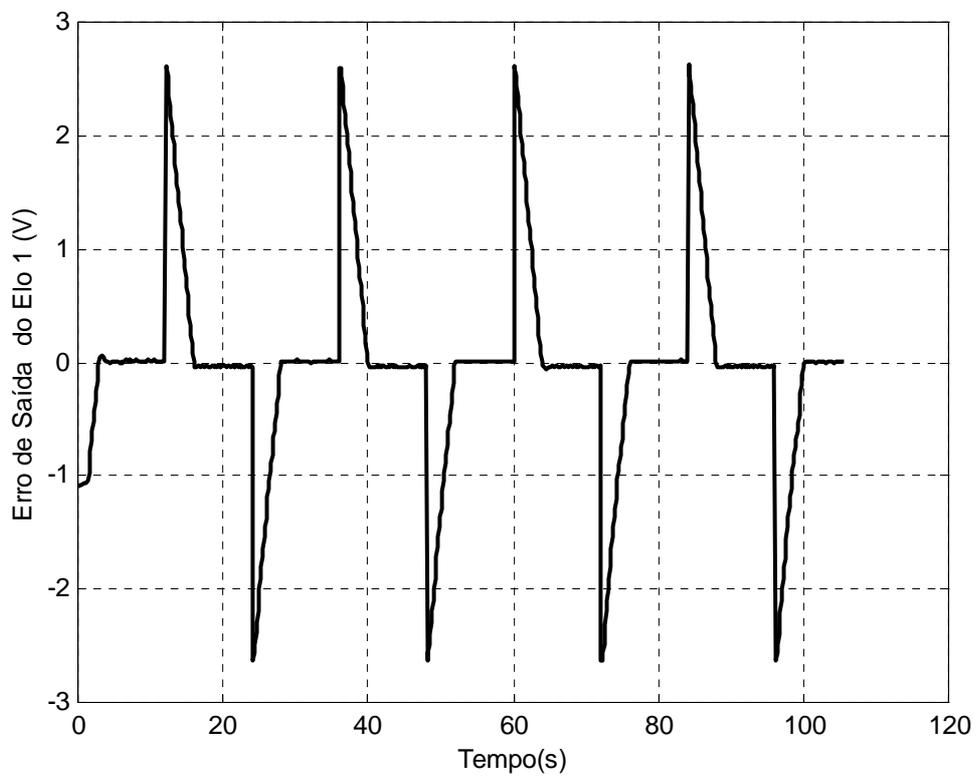


Figura 7: Erro de Saída do Elo 1 do Robô Manipulador

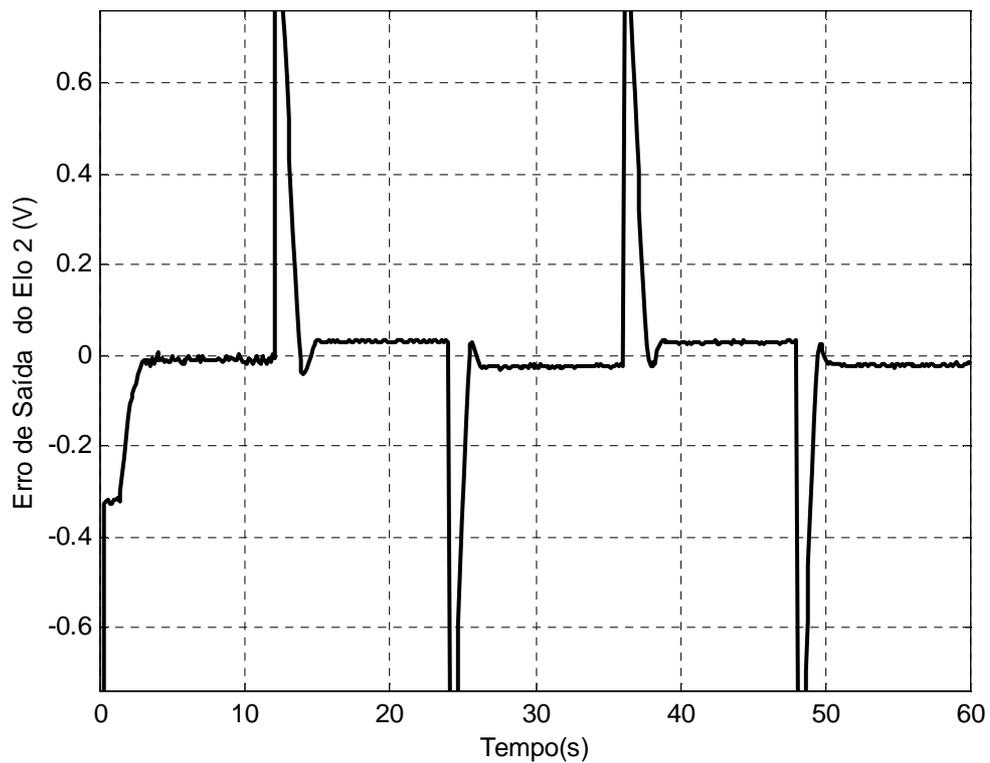


Figura 8: Erro de Saída do Elo 2 do Robô Manipulador

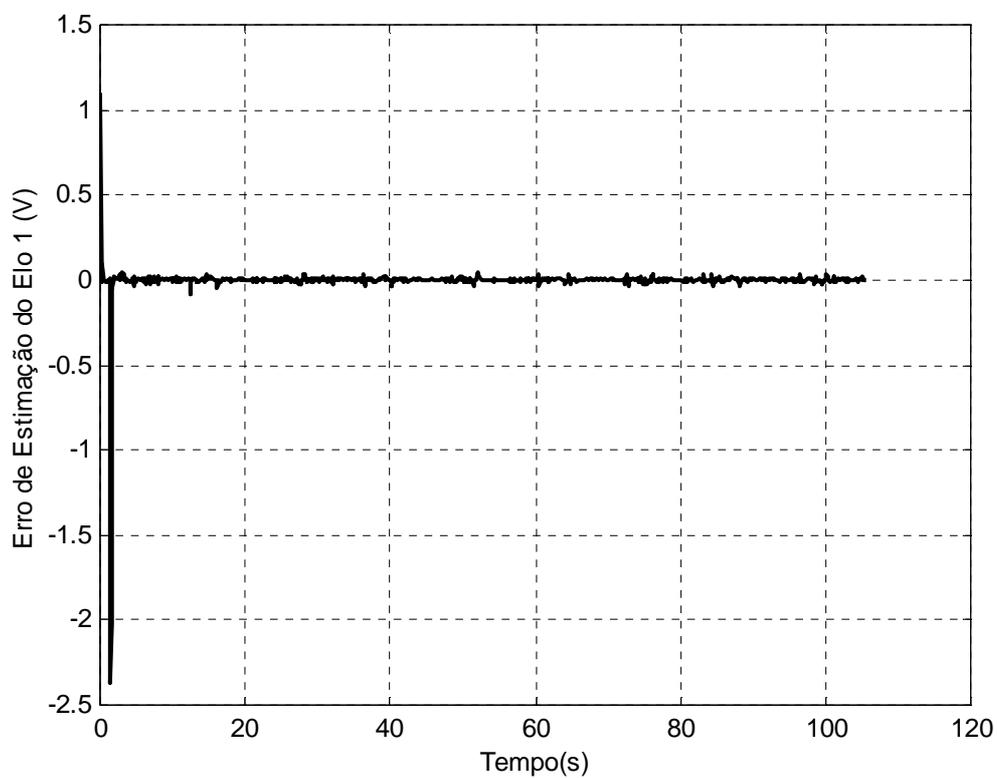


Figura 9: Erro de Estimação do Elo 1 do Robô Manipulador

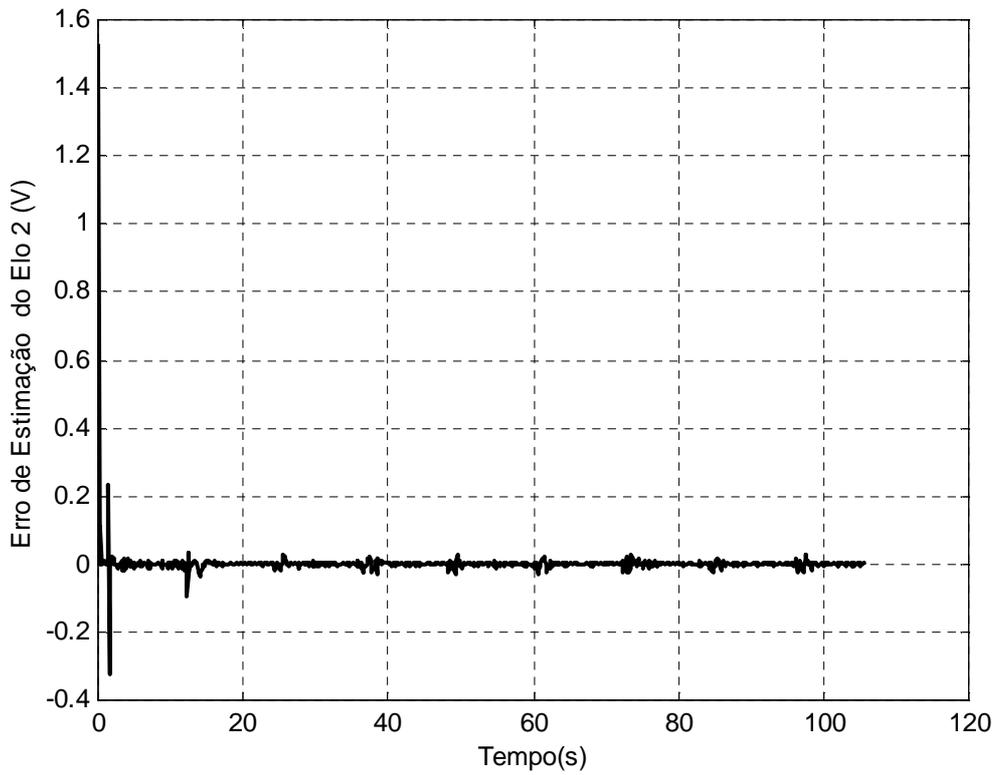


Figura 10: Erro de Estimación do Elo 2 do Robô Manipulador

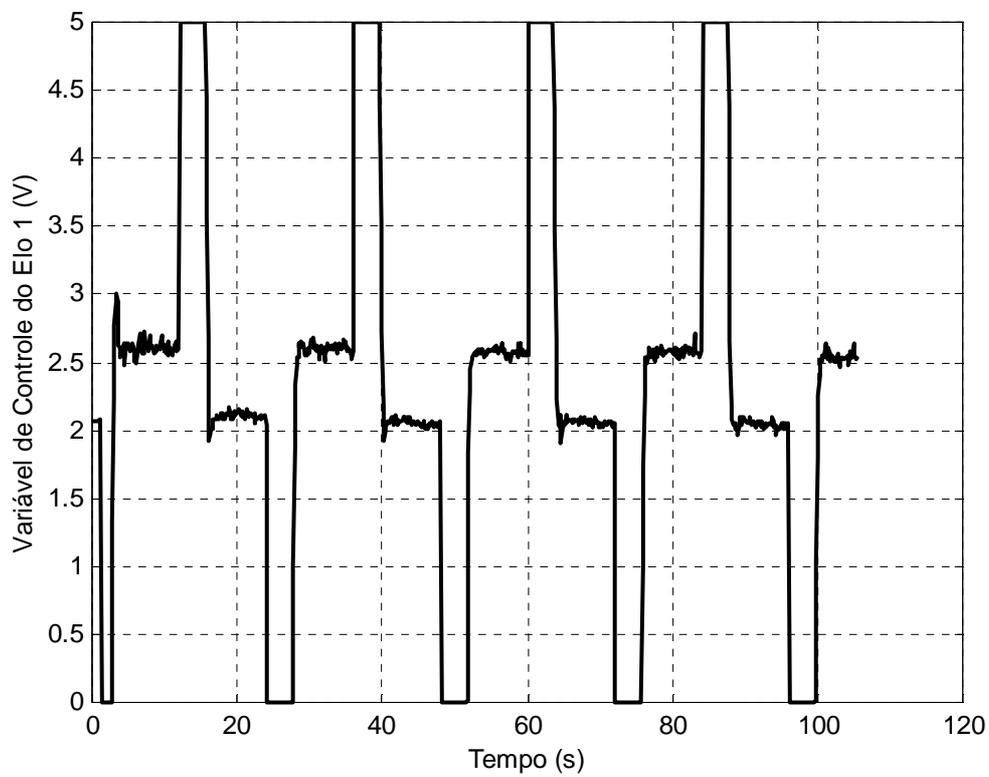


Figura 11: Variável de Controle do Elo 1 do Robô Manipulador

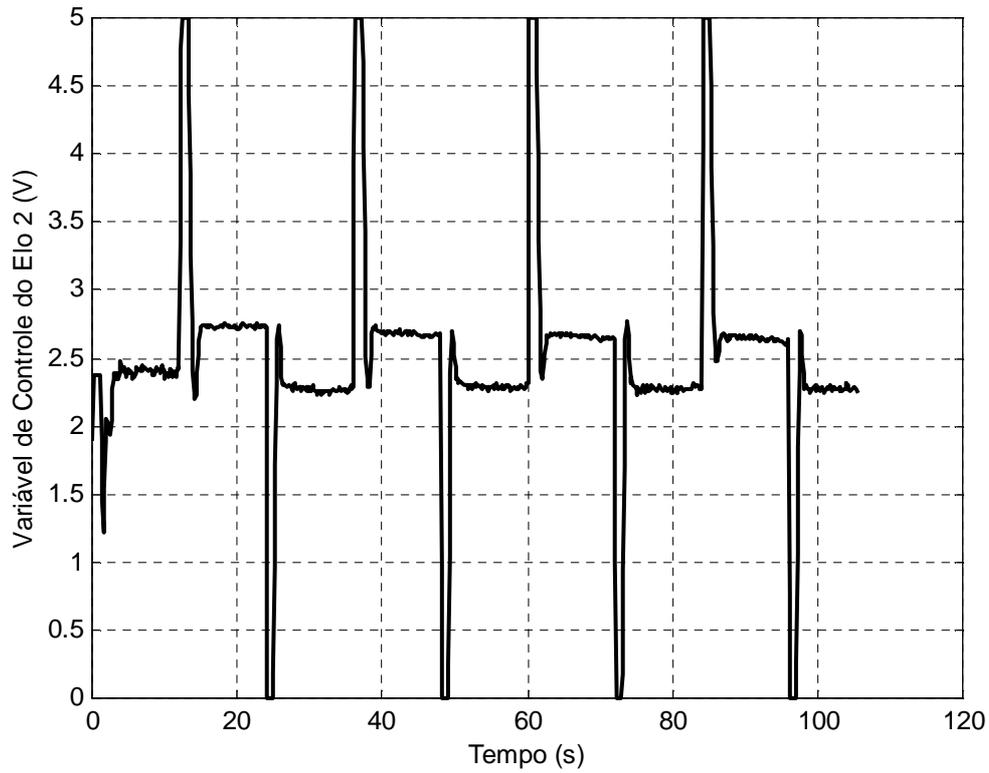


Figura 12: Variável de Controle do Elo 2 do Robô Manipulador

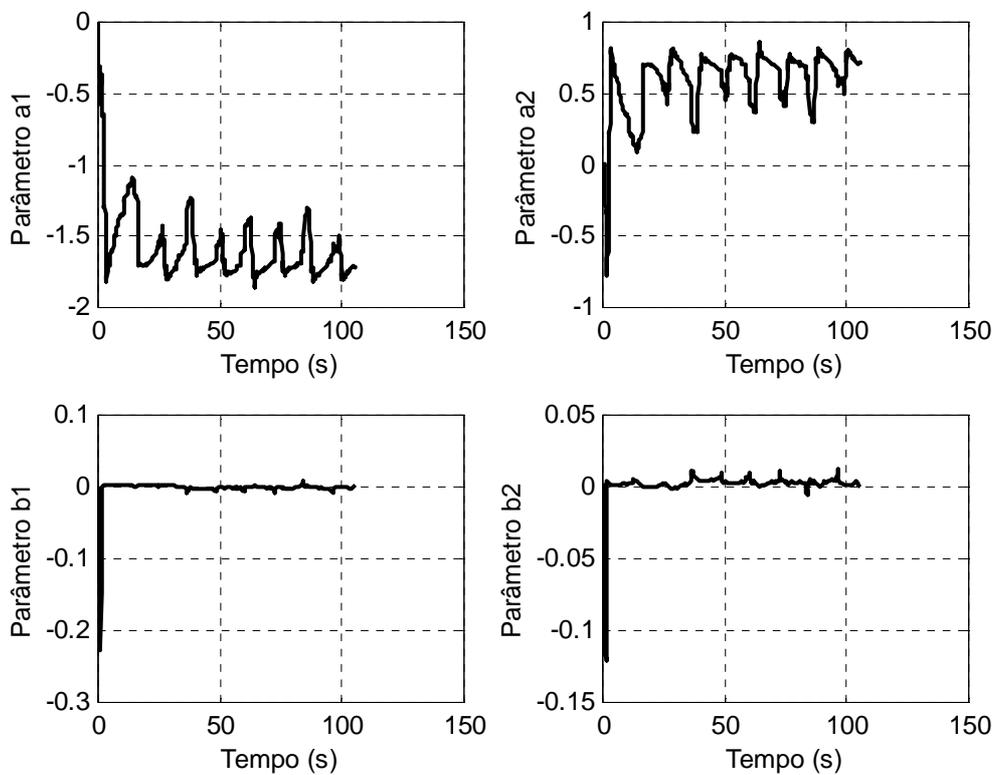


Figura 13: Parâmetros Estimados do Elo 1 do Robô Manipulador

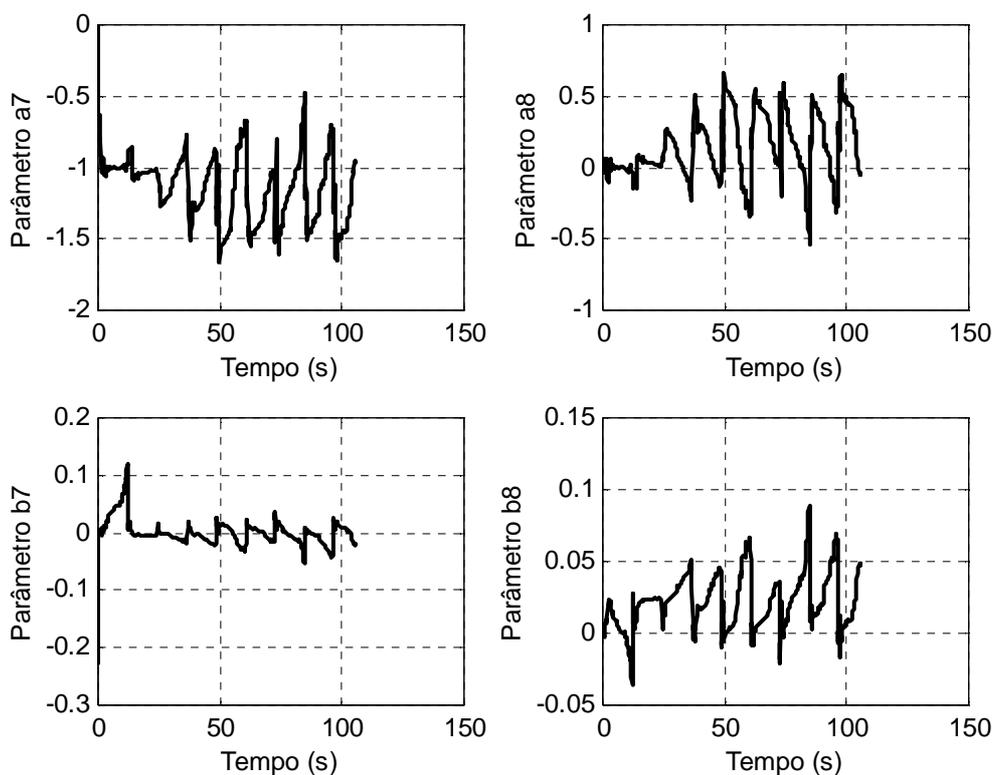


Figura 14: Parâmetros Estimados do Elo 2 do Robô Manipulador

As variáveis de controle mostradas nas Figuras 11 e 12, têm trechos de saturação, que ocorrem nas mudanças das referências. Verifica-se que no elo 1 os trechos são mais duradouros que no elo 2, isto porque o elo 1 deslocava-se de  $170^\circ$  enquanto que o elo 2 deslocava-se  $60^\circ$ , para o seguimento das trajetórias (referências) propostas nas Figuras 5 e 6. O Erro Integral Absoluto (IAE), obtido através da Eq. (35), foi de 384,9 V para o elo 1 e de 80,3 V para o elo 2; dessa forma, o melhor desempenho foi o do elo 2, isto porque, conforme Figuras 5 e 6, o tempo de subida da saída do elo 1 ficou em torno de 1,2 s e do elo 2 em torno de 0,4 s.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e implementação de controladores adaptativos para dois elos de um robô manipulador articulado de 5 GDL. Dos resultados obtidos, verifica-se que com os controladores projetados e implementados, as saídas dos elos atenderam as especificações de desempenho impostas; e desta forma, conclui-se que os controladores DMV – Al-Chalabi e Khalil, podem ser usados em tarefas a serem realizadas por este robô manipulador.

## 8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a capes pelo financiamento desta pesquisa.

## 9 REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., *Introdução à Identificação, Técnicas Lineares e Não – Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Editora UFMG, 2007.
- Aguirre, L. A., *Enciclopédia de Automática, Controle e Automação*, 2ª Edição, volume 3, pp. 130-131, Editora Edgard Blucher, 2007.a.
- Al-Chalabi, L. A., Khalil, F. F., Dahlin Minimum Variance Self-Tuning Controller, *International Journal of Control*, 60(5), 1994.
- Aström, K. J. & Wittenmark, B., *Adaptive Control*, 2ª Edição, Editora Addison - Wesley, 1995.
- Coelho, A. A. R., Coelho, L. S., *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, Editora da UFSC, 2004.
- Craig, J. J., *Introduction to Robotics Mechanics & Control*, Addison - Wesley, 1988.
- Isermann, R., Lachman, K. H., Matko, D., *Adaptive Control Systems*, Editora Prentice Hall, 1992.
- Koivo, A. J., Guo, T., Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulator, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-28, pp. 162-171, 1983.
- Ljung, L., *System Identification. Theory for the User.*, second edn, Prentice Hall, Inc, Upper Saddle River, 1999.
- Rúbio, F. R. & Sánchez, M. J. L., *Control Adaptativo y Robusto*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Espanha, 1996.
- Spong, M. W., Vidyasagar, M., *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.

## 10 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.