



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

*- Mestrado - Doutorado*

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

por

Anrafel Silva Meira

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para a obtenção do grau de Mestre*

**ANRAFEL SILVA MEIRA**

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

**Orientador : Professor José Antônio Riul**

M514ci Meira, Anrafel Silva.

Controle adaptativo aplicado em um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano / Anrafel Silva Meira. - - João Pessoa : [s.n.], 2010. 85f. ; il

Orientador: José Antônio Riul.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica. 2. Robótica. 3. Identificação de sistemas. 4. Controle adaptativo.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

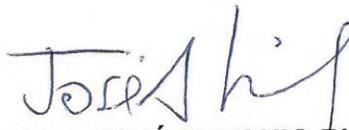
**CONTROLE ADAPTATIVO APLICADO EM UM ROBÔ  
MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS  
DE LIBERDADE CARTESIANO**

por

**ANRAFEL SILVA MEIRA**

*Dissertação aprovada em 14 de dezembro de 2010*

*Período letivo 2010.2*



**Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO RIUL**  
*Orientador – UFPB*



**Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DE MIRANDA MONTENEGRO**  
*Examinador Interno - UFPB*



**Prof. Dr. BENEDITO SANTANA DE OLIVEIRA**  
*Examinador Externo – UFPB*

*Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus irmãos e a toda minha família maravilhosa.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por estar sempre presente em cada momento.

Aos meus pais, pelo o incentivo e apoio, sem eles jamais conseguiria tantas conquistas.

Ao meu orientador José Antônio Riul, por ser um profissional exemplar e que além do seu conhecimento, sempre disponibilizou o melhor ambiente para o desenvolvimento dessa dissertação.

Ao professor Paulo Henrique de Miranda Montenegro, que com a maior tranquilidade me ajudava com o seu conhecimento.

Ao professor Benedito Santana de Oliveira, que gentilmente se disponibilizava a tirar dúvidas minhas, ajudando no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus demais professores do curso de graduação, pois foram eles que formaram minha base de conhecimento.

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

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta um projeto de controladores adaptativos para um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade (3GDL) cartesiano. O robô manipulador é composto basicamente por três válvulas eletropneumáticas e três cilindros pneumáticos. É utilizado o estimador dos mínimos quadrados recursivos (MQR) para a obtenção do modelo representativo dos elos do robô manipulador. O modelo obtido é utilizado no projeto dos controladores adaptativos Dahlin Variância Mínima (DMV) com o critério de Favier e Hassani para o controle de posição dos elos do robô. Os resultados experimentais são apresentados, assim como a avaliação do desempenho obtido pelo robô manipulador.

**Palavras-chave:** Robótica, Identificação de Sistemas, Controle Adaptativo

# **ADAPITIVE CONTROL APPLIED ON A CARTESIAN ELECTROPNEUMATIC MANIPULATOR ROBOT WITH THREE DEGREES OF FREEDOM**

## **ABSTRACT**

This work presents a design of adaptive controllers for cartesian electro-pneumatic manipulator robot with three degrees of freedom (3DOF) cartesian. The manipulator is basically composed of three valves and three electro-pneumatic cylinders. It use the estimator of the recursive least squares (RLS) to obtain the representative model of the links of the manipulator robot. The model is used in the design of adaptive controllers Dahlin Minimum Variance (DMV) with the criterion of Favier and Hassani for position control of links robot. The experimental results are presented, as well as evaluation of the achieved performance by the manipulator robot.

**Keywords:** Robotics, Systems Identification, Adaptive Control

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	01
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	01
1.2	ESTADO DA ARTE .....	02
1.3	OBJETIVOS .....	04
1.3.1	OBJETIVO GERAL .....	04
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	04
1.4	METODOLOGIA .....	04
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	05
2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA .....	06
2.1	INTRODUÇÃO .....	06
2.2	DESCRIÇÃO DO ROBÔ MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE CARTESIANO.....	06
2.2.1	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SISTEMA.....	08
2.2.2	ESPECIFICAÇÕES DAS UNIDADES DE SUMPRIMENTO DE AR COMPRIMIDO E DE TENSÃO.....	10
2.3	CONCLUSÃO .....	11
3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA .....	12
3.1	INTRODUÇÃO .....	12
3.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DO ROBÔ MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE CARTESIANO .....	12
3.3	ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	13
3.4	ESCOLHA DO TEMPO DE AMOSTRAGEM.....	14
3.5	ESCOLHA DO SINAL DE EXCITAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO .....	16

3.6	ESCOLHA DA ORDEM DO MODELO.....	18
3.6.1	RESULTADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DA ORDEM DO MODELO .....	19
3.7	CONCLUSÕES .....	26
4	CONTROLE ADAPTATIVO DO SISTEMA .....	27
4.1	INTRODUÇÃO.....	27
4.2	CONTROLADORES ADAPTATIVOS .....	27
4.3	PROJETO DO CONTROLADOR DMV COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI PARA O ROBÔ MANIPULADOR.....	28
4.4	RESULTADOS OBTIDOS COM O ROBÔ MANIPULADOR SOB A AÇÃO DO CONTROLADOR DMV COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI..	32
4.5	CONCLUSÕES .....	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
5.1	CONCLUSÕES .....	52
5.2	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO .....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
	APÊNDICE A: TÉCNICAS DE CONTROLE ADAPTATIVO.....	58
A.1	CONTROLE AUTO-AJUSTÁVEL BASEADO NA ESTRATÉGIA DE VARIÂNCIA MÍNIMA .....	58
A.2	CONTROLE DE DAHLIN .....	61
A.3	CONTROLADOR AUTO-AJUSTÁVEL DE DAHLIN-VARIÂNCIA MÍNIMA (DMV).....	62
A.4	CONTROLADOR DAHLIN-VARIÂNCIA MÍNIMA COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI .....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano.....	07
Figura 2.2	Foto do robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano.....	07
Figura 2.3	Diagrama de blocos da bancada de testes .....	08
Figura 2.4	Bancada de testes .....	08
Figura 3.1	Resposta em malha aberta do elo X do robô.....	15
Figura 3.2	Resposta em malha aberta do elo Z do robô .....	15
Figura 3.3	Resposta em malha aberta do elo Y do robô.....	16
Figura 3.4	Sinal de excitação do elo X.....	17
Figura 3.5	Sinal de excitação do elo Z .....	17
Figura 3.6	Sinal de excitação do elo Y .....	18
Figura 3.7	Teste de detecção da ordem do modelo do elo X.....	22
Figura 3.8	Teste de detecção da ordem do modelo do elo Z.....	22
Figura 3.9	Teste de detecção da ordem do modelo do elo Y.....	23
Figura 3.10	Resposta real e estimada em malha aberta do elo X .....	23
Figura 3.11	Resposta real e estimada em malha aberta do elo Z.....	24
Figura 3.12	Resposta real e estimada em malha aberta do elo Y .....	24
Figura 3.13	Parâmetros estimados do elo X .....	25
Figura 3.14	Parâmetros estimados do elo Z.....	25
Figura 3.15	Parâmetros estimados do elo Y .....	26
Figura 4.1	Diagrama de blocos do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani .....	32
Figura 4.2	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,1$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	33
Figura 4.3	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,1$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	34

Figura 4.4	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,1$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	34
Figura 4.5	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	35
Figura 4.6	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	36
Figura 4.7	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ .....	36
Figura 4.8	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$ .....	37
Figura 4.9	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$ .....	38
Figura 4.10	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$ .....	38
Figura 4.11	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$ .....	39
Figura 4.12	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$ .....	40
Figura 4.13	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$ .....	40
Figura 4.14	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$ .....	41
Figura 4.15	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$ .....	42
Figura 4.16	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = p_y = 0,9$ e $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$ .....	42
Figura 4.17	Referência e resposta real do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ ...	43
Figura 4.18	Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ ...	44
Figura 4.19	Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ ...	44

Figura 4.20	Variável de controle do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	45
Figura 4.21	Variável de controle do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	46
Figura 4.22	Variável de controle do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	46
Figura 4.23	Erro de saída do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	47
Figura 4.24	Erro de saída do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	48
Figura 4.25	Erro de saída do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	48
Figura 4.26	Parâmetros estimados do elo X do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	49
Figura 4.27	Parâmetros estimados do elo Z do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	50
Figura 4.28	Parâmetros estimados do elo Y do robô utilizando $p_x = p_z = 0,8; p_y = 0,5;$ $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	50
Figura A.1	Controlador de Dahlin em série com o controlador de variância mínima ..	63
Figura A.2	Controlador DMV .....	64
Figura A.3	Controlador DMV modificado para tratar de sistemas de fase não mínima.....	65
Figura A.4	Sistema generalizado para o controlador DMV com o critério de Favier e Hassani .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações técnicas dos cilindros pneumáticos utilizados nos elos X e Z .....	09
Tabela 2.2	Especificações técnica do cilindro pneumático utilizado no elo Y .....	09
Tabela 2.3	Especificações técnica das válvulas eletropneumáticas proporcionais .....	10
Tabela 3.1	Índices de desempenho dos modelos do elo X.....	20
Tabela 3.2	Índices de desempenho dos modelos do elo Z .....	20
Tabela 3.3	Índices de desempenho dos modelos do elo Y.....	21
Tabela 4.1	Polinômios de ponderação para os testes realizados utilizando os controladores projetados .....	33
Tabela 4.2	Desempenho obtido com o elo X sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	45
Tabela 4.3	Desempenho obtido com o elo Z sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	45
Tabela 4.4	Desempenho obtido com o elo Y sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando $p_x = p_z = 0,8$ ; $p_y = 0,5$ ; $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ; $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ; $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_i, b_j, c_i, f_i, g_i$  e  $q_i$  – Parâmetros dos polinômios  $A(z^{-1})$  e  $B(z^{-1})$ ,  $C(z^{-1})$ ,  $F(z^{-1})$ ,  $G(z^{-1})$  e  $Q(z^{-1})$

$AIC$  – Critério de informação de Akaike

$ARMAX$  – Modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas

$ARX$  – Modelo auto-regressivo com entradas externas

$A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1}), F(z^{-1}), G(z^{-1}), Q(z^{-1}), X(z^{-1})$  – Polinômios em  $z^{-1}$

$d$  – Atraso de transporte

$D_0(z^{-1})$  – Equação de síntese em malha aberta equivalente para o controlador de Dahlin

$DMV$  – Controlador Dahlin variância mínima

$E[\cdot]$  – Esperança matemática

$e(k)$  – Ruído branco

$G_0(z^{-1})$  – Função de transferência do sistema a ser controlado

$GDL$  – Graus de liberdade

$GMV$  – Controlador variância mínima generalizado

$GPC$  – Controlador Preditivo Generalizado

$G_{MF}(z^{-1})$  – Função de transferência de malha fechada

$G_S(z^{-1})$  – Função de transferência suplementar

$J\{\cdot\}$  – Função custo

$K(k)$  – Ganho do estimador

$LQG$  – Controlador linear quadrático Gaussiano

$MQR$  – Algoritmo do mínimos quadrados recursivos

$MV$  – Controlador variância mínima

$N$  – Número de amostras do experimento

$n_a$  – Número de pólos do sistema (ordem do modelo)

$n_b$  – Número de zeros do sistema

$n_c$  – Ordem do polinômio  $C(z^{-1})$

$n_g$  – Ordem do polinômio  $G(z^{-1})$

$n_p$  – Número de parâmetros estimados

$p$  – Parâmetro de Dahlin

$P(k)$  – Matriz de covariância do estimador

PP – Controlador por alocação de pólos

$R^2$  – Coeficiente de correlação múltipla

SEQ – Somatório dos erros quadráticos

SISO – Sistema de uma entrada e uma saída

STR – Controlador auto ajustável

$t_{95\%}$  – Tempo necessário para que a resposta do sistema à entrada degrau atinja 95% do seu valor final

$t_a$  – Tempo de amostragem

$u(k)$  – Entrada do sistema, lei de controle ou sinal de controle no instante  $k$

$u_r(k)$  – Referência para o sinal de controle  $u(k)$

$w(k)$  – Sinal de referência no instante  $k$

$x(k)$  – Posição do elo X no instante  $k$

$y(k)$  – Posição do elo Y no instante  $k$

$z(k)$  – Posição do elo Z no instante  $k$

$x_{mm}, z_{mm}, y_{mm}$  – Posições das hastes dos cilindros em milímetros dos elos X, Z e Y respectivamente

$x_v, z_v, y_v$  – Posições das hastes em volts dos elos X, Z e Y respectivamente

$\theta(k)$  – Vetor de parâmetros do sistema

$\hat{\theta}(k)$  – Vetor de parâmetros estimados

$\lambda$  – Fator de esquecimento

$\rho(k)$  – Saída do sistema no instante  $k$

$\sigma_e^2$  – Variância do ruído branco  $e(k)$

$\phi^T(k-1)$  – Vetor de medidas

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os robôs manipuladores são combinações de elementos estruturais rígidos (elos), conectados entre si através de articulações ou juntas, onde na sua extremidade é colocada a ferramenta ou dispositivo para realização da tarefa (ROMANO, 2002). Em particular, os robôs manipuladores cartesianos, objeto de estudo deste trabalho, são bem aceitos na indústria, sendo utilizados em aplicações tais como solda a arco, corte por jato de água e inspeção de grandes peças complexas (LEWIS *et. al.*, 2004).

O controle de manipuladores robóticos é uma área madura ainda frutífera para investigação, desenvolvimento e fabricação (LEWIS *et. al.*, 2004). Para o projeto de controladores geralmente é necessário dispor de um modelo matemático. Estes modelos podem ser obtidos usando as leis físicas (modelos caixa branca) ou usando técnicas de identificação que utilizam dados de entrada e saída dos sistemas (modelos caixa preta). Modelos caixa branca desses sistemas são não lineares (SPONG E VIDYASAGAR, 1989), e 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), enquanto que a modelagem caixa preta pode gerar modelos lineares (AGUIRRE, 2007b, ASTROM & WITTENMARK, 1995, ISERMANN, 1992). 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 dependem de treinamentos, para posterior uso em controle em tempo real, o que as colocam em desvantagem

quando comparadas com outras técnicas de identificação e de controle adaptativo.

A maioria das malhas de controles industriais, cerca de 90 %, foi projetada com base em controladores PID (SEBORG, 1994), porém esses controladores não apresentam desempenho aceitável quando perturbações e variações do processo são significativas, forçando a estratégias de controle mais bem elaboradas (VAZ, 1999). Diante de tais problemas o controle adaptativo torna-se uma alternativa bem aceitável, já que combina técnicas de identificação em tempo real com técnicas de projeto de sistemas de controle. Portanto, esse trabalho se propôs a projetar controladores adaptativos para um robô manipulador, tentando solucionar os problemas das técnicas convencionais.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

O interesse em se utilizar uma teoria de controle adaptativo surgiu na década de 1950 para o desenvolvimento de pilotos automáticos de aviões que operam em uma ampla faixa de velocidade e de altitude, porém devido à falta de técnicas adequadas para a realização do controle fez com que esse interesse diminuísse (ASTROM & WITTENMARK, 1995).

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 e Wittenmark; 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 os controladores GMV e DMV.

ALMEIDA *et. al.* (1999) projetaram um controlador híbrido utilizando um controlador PID nebuloso com ganho escalonado e um controlador adaptativo DMV modificado para o controle de luminosidade de uma lâmpada. Explorando assim o conjunto de regras nebulosas que leva a saída do sistema a uma rápida convergência para a referência com a capacidade preditiva e de robustez do controlador adaptativo DMV modificado.

MARTINS (2001) projetou um controlador adaptativo para robôs manipuladores no espaço de juntas utilizando uma lei de controle adaptativa composta que usa o erro de predição e os erros de seguimento para direcionar a estimação de parâmetros baseando-se na passividade e no método direto de Lyapunov. As vantagens encontradas nesse algoritmo são de não necessitar da medição de aceleração nas juntas e de não necessitar que a inversa da matriz de inércia estimada seja limitada.

QUILES *et al* (2002) apresentam técnicas de controle adaptativo do tipo PI por imposição de pólos e variância mínima (MV) para um sistema pneumático. Utilizam em seus projetos uma técnica denominada *Preditor de Smith* para compensar o atraso de transporte presente no sistema.

CÂMARA *et al* (2002) utilizam um controlador adaptativo robusto por modelo de referência em um servomecanismo de posição para motor de indução trifásico.

MONTENEGRO *et al* (2004) apresentaram resultados obtidos com um controlador adaptativo via alocação de pólos para posicionamento da haste do cilindro de um sistema eletro-pneumático.

RIUL *et al* (2004) apresentaram resultados de um controlador adaptativo proporcional integral via alocação de pólos, aplicado em uma mesa de coordenadas de dois graus de liberdade composta de duas bases.

SILVA *et al* (2004) utilizaram a técnica de *gain scheduling* para controle de torque em um sistema de acoplamento eletromagnético com dinâmica não linear. Devido à complexidade para obter-se um modelo analítico da planta, usou-se a técnica de identificação em diversos pontos de operação e através de simulações foram calculados os parâmetros dos controladores utilizando a técnica de alocação de pólos.

MONTENEGRO (2007) apresentou resultados do uso da técnica de controle adaptativo para o controle de temperatura de ar em um túnel psicrométrico utilizando um modelo matemático representativo do túnel psicrométrico obtido por técnicas de identificação paramétrica em tempo real, através do algoritmo dos mínimos quadrados recursivos. Sendo projetado um controlador proporcional integral (PI) com ganho tabelado, um controlador PI auto-ajustável via alocação de pólos, um controlador de variância mínima (MV) auto-ajustável e um controlador preditivo generalizado (GPC) auto-ajustável.

CARVALHO (2009) em sua tese obteve um modelo matemático representativo de um robô manipulador planar de dois graus de liberdade pelo método dos mínimos

quadrados recursivo e projetou controladores adaptativos de variância mínima generalizado (GMV) visando o controle de posição do robô conforme trajetórias especificadas para ambos os elos.

SOUZA (2010) desenvolveu controladores adaptativos usando a técnica de controle Dahlin Variância Mínima (DMV) para dois elos do robô manipulador utilizado nessa dissertação.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Projetar controladores adaptativos para o posicionamento dos elos de um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Encontrar modelos representativos para os três elos do robô manipulador.
- Implementar controladores adaptativos para os elos do robô manipulador.
- Analisar os resultados obtidos com os controladores utilizados.

## **1.4 METODOLOGIA**

No processo de identificação do sistema serão considerados modelos específicos para representar os elos do sistema, e então serão realizados estudos comparativos, através de programas desenvolvidos nas plataformas LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup> utilizando um algoritmo recursivo de estimação de parâmetros, entre diversas estruturas dos modelos. As comparações serão realizadas tomando como base os somatórios dos erros quadráticos, os coeficientes de correlação múltipla e os critérios de informação de Akaike.

No projeto dos controladores adaptativos serão considerados os modelos encontrados no processo de identificação. Os controladores serão implementados através de programas desenvolvidos na plataforma LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup>.

## **1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Esta dissertação é basicamente disposta em cinco capítulos. O capítulo I apresenta a justificativa do trabalho, comenta sobre trabalhos realizados na área e logo após descreve-se os objetivos a serem alcançados e a metodologia utilizada. O capítulo II descreve o robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano, objeto de estudo deste trabalho. O capítulo III mostra a modelagem matemática realizada para a obtenção dos modelos representativos dos elos do robô manipulador. O capítulo IV mostra os controladores projetados para o controle de posição dos elos do robô manipulador, assim como os resultados obtidos. O capítulo V traz algumas conclusões e perspectivas futuras para o trabalho apresentado nesta dissertação. No final têm-se o apêndice A que trata em demonstrar a teoria de controle adaptativo utilizada neste trabalho.

## **CAPÍTULO II**

### **DESCRIÇÃO DO SISTEMA**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta a descrição do sistema em estudo, o robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano, que se encontra no Laboratório de Dinâmica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e que foi projetado e montado por professores deste laboratório. A seção 2.2 descreve o robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano assim como o seu funcionamento com o sistema computacional. A seção 2.2.1 apresenta as especificações técnicas dos componentes que compõe o robô manipulador e o sistema computacional. A seção 2.2.2 apresenta as especificações das unidades de suprimento de ar comprimido e de tensão. E a seção 2.3 apresenta uma conclusão sobre o capítulo.

#### **2.2 DESCRIÇÃO DO ROBÔ MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE CARTESIANO**

O robô manipulador conforme mostrado na Fig. (2.1) e na Fig. (2.2) 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. As posições dos cilindros pneumáticos são medidas por régulas potenciométricas.

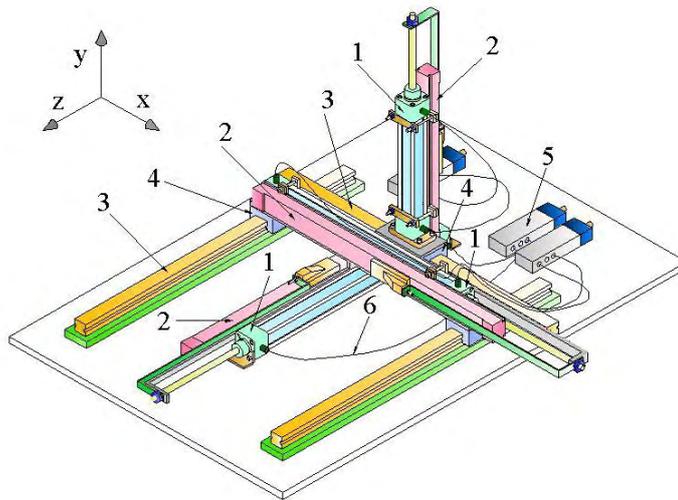


Figura 2.1 – Robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano formado por: (1) cilindros pneumáticos; (2) régulas potenciométricas; (3) guias; (4) patins de esferas; (5) válvulas eletropneumáticas proporcionais; (6) dutos de condução de ar comprimido



Figura 2.2 – Foto do robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano

Um computador é utilizado para enviar os sinais de acionamento das válvulas e receber os sinais das réguas potenciométricas através de programas desenvolvidos na plataforma LabVIEW<sup>®</sup> com rotinas escritas na plataforma Matlab<sup>®</sup>. A comunicação do robô com o computador é realizada por duas placas de aquisição de dados. A Fig. (2.3) mostra de forma esquemática o sistema de aquisição de dados e a Fig. (2.4) mostra uma vista da bancada de testes montada.

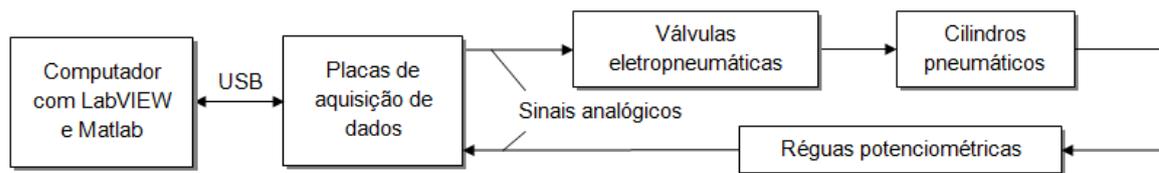


Figura 2.3 – Diagrama de blocos da bancada de testes



Figura 2.4 – Bancada de testes

### 2.2.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Os cilindros pneumáticos utilizados são da série CWE da Wherk-Schott<sup>®</sup>, as principais especificações técnicas estão na Tab. (2.1) para os elos X e Z e Tab. (2.2) para o elo Y.

Tabela 2.1 – Especificações técnicas dos cilindros pneumáticos utilizados nos elos X e Z

<b>Modelo/Fabricante</b>	<b>CWEA03273310X0400/Werk-Schott</b>
Tipo	Dupla ação com haste simples
Diâmetro	32 mm
Pressão de trabalho	Até 1,0 MPa (10 bar)
Curso efetivo	400 mm
Fluido	Ar comprimido filtrado
Temperatura ambiente	-10 °C a 80 °C
Força teórica a 0,6 MPa, avanço	482,55 N
Força teórica a 0,6 MPa, retorno	414,70 N

Tabela 2.2 – Especificações técnica do cilindro pneumático utilizado no elo Y

<b>Modelo/Fabricante</b>	<b>CWEA03273310X0200/Werk-Schott</b>
Tipo	Dupla ação com haste simples
Diâmetro	32 mm
Pressão de trabalho	Até 1,0 MPa (10 bar)
Curso efetivo	200 mm
Fluido	Ar comprimido filtrado
Temperatura ambiente	-10 °C a 80 °C
Força teórica a 0,6 MPa, avanço	482,55 N
Força teórica a 0,6 MPa, retorno	414,70 N

As régua potenciométricas são de fabricação Festo<sup>®</sup>, para o elo X utilizou-se uma de escala de 450 mm de especificação MLO-POT-450-TLF, para o elo Z utilizou-se uma de escala de 500 mm de especificação MLO-POT-500-TLF e para o elo Y utilizou-se uma de escala de 225 mm de especificação MLO-POT-225-TLF, todas com resolução de 0,01 mm. As régua são acopladas longitudinalmente aos cilindros pneumáticos fixando o seu cursor a haste do cilindro, de acordo com a Fig. (2.1). As posições dos cilindros correspondem a tensões em volts dadas pelas régua. Para converter a tensão em volts dada pela régua para o valor em milímetros, procedeu-se da seguinte forma: posicionou-se as hastes dos cilindros em diversas posições ao longo dos seus cursos medindo-as com uma escalas métricas e obtendo seus valores em volts, com esses dados fez-se ajustes de curvas obtendo-se as funções abaixo:

$$x_{mm} = 88,69x_v - 1,83 \quad (2.1)$$

$$z_{mm} = 98,79z_v - 5,38 \quad (2.2)$$

$$y_{mm} = 44,93y_v + 63,25 \quad (2.3)$$

onde:  $x_{mm}$ ,  $z_{mm}$  e  $y_{mm}$  são as posições em milímetros dos elos X, Z e Y respectivamente e  $x_v$ ,  $z_v$  e  $y_v$  são as posições em volts dos elos X, Z e Y respectivamente

As válvulas eletropneumáticas proporcionais de 5/3 vias são da série MPYE da Festo® e as especificações técnicas dessas válvulas estão na Tab. (2.3).

Tabela 2.3 – Especificações técnica das válvulas eletropneumáticas proporcionais

<b>Modelo/Fabricante</b>	<b>MPYE-5-1/8-HF-010-B/Festo</b>
Tipo	5/3 vias
Pressão absoluta de trabalho	Até 1,0 MPa (10 bar)
Vazão nominal	700 l/min
Temperatura de trabalho	5 °C a 40 °C
Temperatura ambiente	0 °C a 50 °C
Tensão de alimentação	24 VDC
Tensão de excitação	0 a 10 VDC

O computador utilizado no experimento possui um processador de Genuine Intel® de 1,60 GHz de velocidade de processamento e 960MB de memória RAM. As duas placas de aquisição de dados são de fabricação da National Instruments® de especificação NI USB 6009, sendo uma para receber os sinais das régua potenciométricas dos elos X e Z e enviar os sinais de excitação para as válvulas que acionam esses elos e a outra pra receber o sinal da régua potenciométrica do elo Y e enviar o sinal de excitação da válvula que aciona esse elo. Estas placas possuem 8 canais de entrada analógica e 2 de saída, 12 digitais entradas/saídas, interface USB com o computador, taxa de amostragem 48kS/s, faixa de tensão de entrada de  $\pm 1$  VDC a  $\pm 20$  VDC e faixa de tensão de saída de 0 a 5 VDC.

Como a tensão de entrada das válvulas (0 a 10 VDC) é diferente da tensão de saída das placas de aquisição de dados (0 a 5 VDC), utilizou-se um amplificador de potência para a passagem de tensão das placas para as válvulas.

## **2.2.2 ESPECIFICAÇÕES DAS UNIDADES DE SUPRIMENTO DE AR COMPRIMIDO E DE TENSÃO**

A unidade de suprimento de ar comprimido é dotada de um compressor de fabricação SCHULZ, modelo MS 10 ML/175 que funciona de forma intermitente de acordo com a pressão ajustada no pressostato responsável pelo acionamento de sua

máquina motriz. Este compressor possui uma capacidade de compressão de 283,17 l/min a uma pressão máxima de 8,3 MPa e a capacidade do seu reservatório é de 175 litros.

O ar comprimido é tratado por uma unidade composta por um filtro regulador de pressão e por um lubrificador, ambos da Werk-Schott<sup>®</sup>. Estes são dispositivos indispensáveis para o correto funcionamento dos equipamentos pneumáticos aumentando a vida útil de seus componentes tornando o ar comprimido livre de umidade e impurezas com a pressão necessária regulada e lubrificada conforme a necessidade do equipamento.

Utilizou-se também um regulador de corrente contínua de fabricação MINIPA<sup>®</sup>, modelo MPL-3003, para fornecer a potência necessária às válvulas eletropneumáticas proporcionais a uma tensão de 24 VDC, além das tensões auxiliares de alimentação das régua potenciométricas.

## **2.3 CONCLUSÃO**

Neste capítulo foi apresentado o robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano, assim como o seu funcionamento com o sistema computacional. Apresentaram-se também as especificações técnicas dos componentes do robô, do sistema computacional e das unidades de suprimento de ar comprimido e de tensão.

E nas Eq. (2.1), Eq. (2.2) e Eq. (2.3) foram apresentadas as funções lineares que convertem as posições das hastes dos cilindros medidas pelas régua potenciométricas em volts para milímetros.

## **CAPÍTULO III**

### **MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta todo o procedimento realizado para a determinação do modelo paramétrico dos elos do robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano. Na seção 3.2 é apresentado o modelo matemático escolhido para representar os elos do robô. Na seção 3.3 é apresentado o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos, utilizado na estimação dos parâmetros do modelo escolhido. Na seção 3.4 é mostrado como foi feita a escolha do tempo de amostragem. Na seção 3.5 são mostrados os sinais de excitação. Na seção 3.6 são apresentados os índices de desempenhos utilizados para escolha da melhor estrutura do modelo escolhido. Na seção 3.6.1 são apresentados os resultados obtidos no procedimento de escolha de melhor estrutura do modelo escolhido. A seção 3.7 apresenta as conclusões do capítulo.

#### **3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO ROBÔ MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE CARTESIANO**

O processo de modelagem matemática consiste em obter um modelo que represente a dinâmica do sistema. Na modelagem do robô manipulador sob análise utilizou-se a identificação caixa preta, tendo em vista sua utilização no projeto e implementação dos controladores adaptativos para o posicionamento dos elos do robô.

Como a dinâmica dos elos do robô é desacoplada, realizou-se a identificação dos mesmos, de forma independente, usando o modelo ARX (autoregressive with exogeneous

inputs), com uma perturbação, que é a representação mais comum para sistema físico de uma entrada e uma saída (SISO – single input single output). A equação a diferenças do modelo auto-regressivo com entrada exógena (ARX) (ÅSTRÖM & WITTENMARK, 1995; AGUIRRE, 2007b) é dada de forma genérica pela Eq. (3.1).

$$\rho(k) = \varphi^T(k-1)\theta(k) + e(k) \quad (3.1)$$

sendo:

$$\theta^T(k) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{n_a} \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n_b}] \quad (3.2)$$

$$\varphi^T(k) = [-\rho(k-1) \quad -\rho(k-2) \quad \dots \quad -\rho(k-n_a) \quad u(k-d) \quad u(k-d-1) \quad \dots \quad u(k-d-n_b)] \quad (3.3)$$

onde:  $\rho(k)$  – saída do sistema, sendo igual a  $x(k)$  para o elo X,  $z(k)$  para o elo Z e  $y(k)$  para o elo Y;  $u(k)$  – entrada do sistema, sendo igual a  $u_x(k)$  para o elo X,  $u_z(k)$  para o elo Z e  $u_y(k)$  para o elo Y;  $\varphi^T(k-1)$  – vetor de medidas;  $\theta(k)$  – vetor de parâmetros do sistema;  $e(k)$  – ruído branco;  $a_i$  e  $b_j$  – parâmetros do modelo;  $n_a$  – número de pólos do sistema (ordem do modelo);  $n_b$  – número de zeros do sistema;  $d$  – atraso de transporte.

### 3.3 ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para a implementação de controladores adaptativos precisa-se que os parâmetros do sistema sejam estimados em tempo real a cada período de amostragem, sendo assim utilizou-se o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR) para o processo de estimação, já que este é de simples implementação e apresenta uma taxa de convergência alta (VAZ, 1999).

O estimador dos mínimos quadrados recursivo (MQR) com um fator de esquecimento  $\lambda$  é dado pelo seguinte conjunto de equações (COELHO E COELHO, 2004, LJUNG, 1999):

$$K(k) = \frac{P(k)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k)\varphi(k)} \quad (3.4)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \{ \rho(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \} \quad (3.5)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \{ P(k-1) - K(k) \varphi^T(k) P(k-1) \} \quad (3.6)$$

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.

O fator de esquecimento  $\lambda$  assume valores entre 0,9 e 1, sendo que para  $\lambda = 1$  tem-se o MQR padrão.

### 3.4 ESCOLHA DO TEMPO DE AMOSTRAGEM

Na identificação de sistemas o tempo de amostragem é um parâmetro importante a ser selecionado. Do ponto de vista numérico o tempo de amostragem não pode ser nem muito grande, por razões óbvias (neste caso o comportamento do sistema não seria descrito corretamente), e nem muito pequeno, pois a diferença entre uma e outra medida seria muito pequena, fazendo com que erros de medições influenciassem significativamente nos resultados da identificação (MALIK *et al.*, 1991).

ISERMANN citado por MALIK *et al.* (1991) sugere que o tempo de amostragem  $t_a$  esteja dentro do intervalo mostrado na Eq. (3.7):

$$\frac{t_{95\%}}{15} \leq t_a \leq \frac{t_{95\%}}{5} \quad (3.7)$$

onde:  $t_{95\%}$  é o tempo necessário para que a resposta do sistema à entrada degrau atinja 95% do seu valor final.

Para determinar o tempo de amostragem do sistema fez-se o seguinte procedimento: primeiramente ajustou-se a pressão do sistema para 0,2 MPa (2 bar) e depois posicionou-se os três elos em suas posições iniciais (recuados na direção da origem dos seus eixos), em seguida excitou-os aplicando pulsos de 0,54 segundos às suas válvulas, sendo o do elo X de 3,5 V de amplitude, o do elo Z de 4,5 V de

amplitude e o do elo Y de 3,0 V de amplitude. As Fig. (3.1), Fig. (3.2) e Fig. (3.3), mostram as respostas obtidas para os elos X, Z e Y, respectivamente.

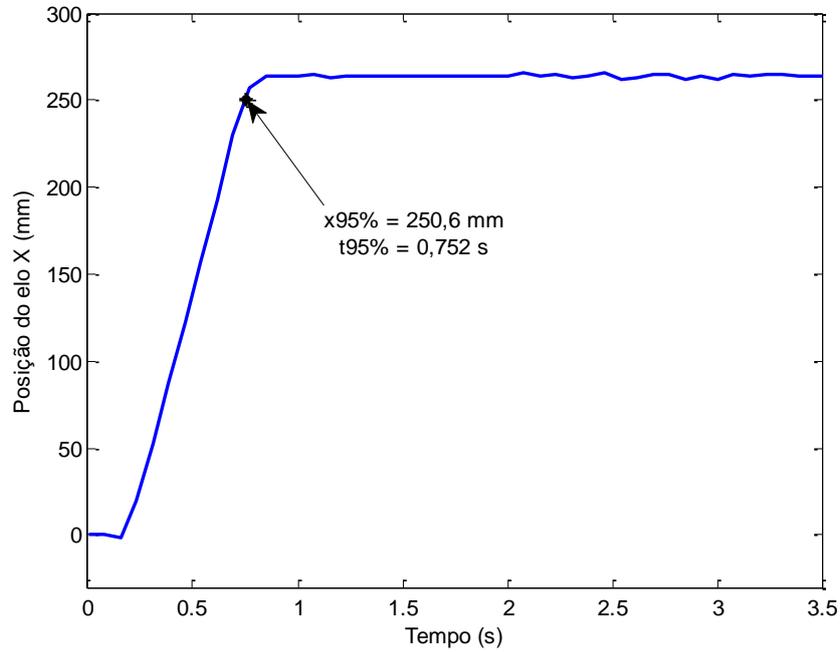


Figura 3.1 – Resposta em malha aberta do elo X do robô

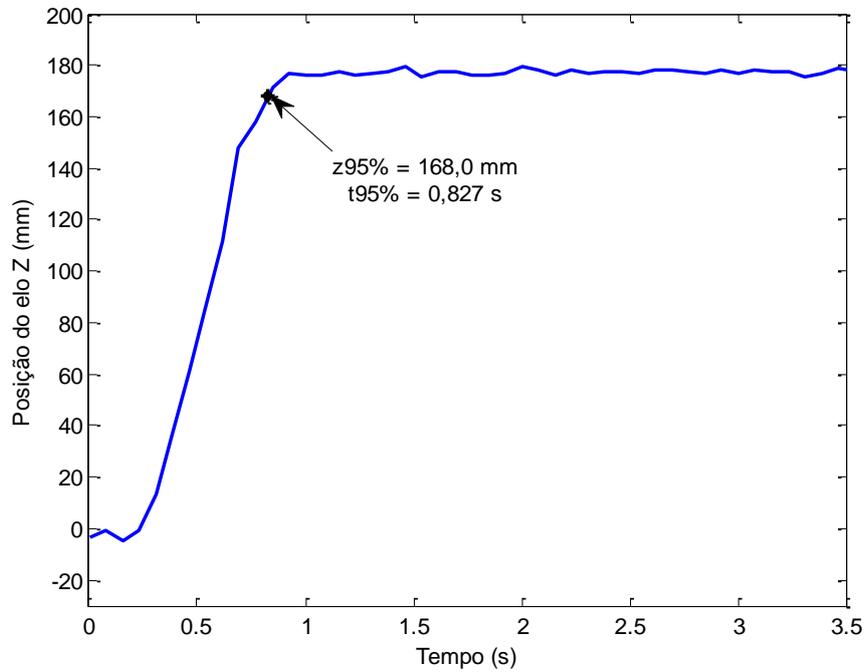


Figura 3.2 – Resposta em malha aberta do elo Z do robô

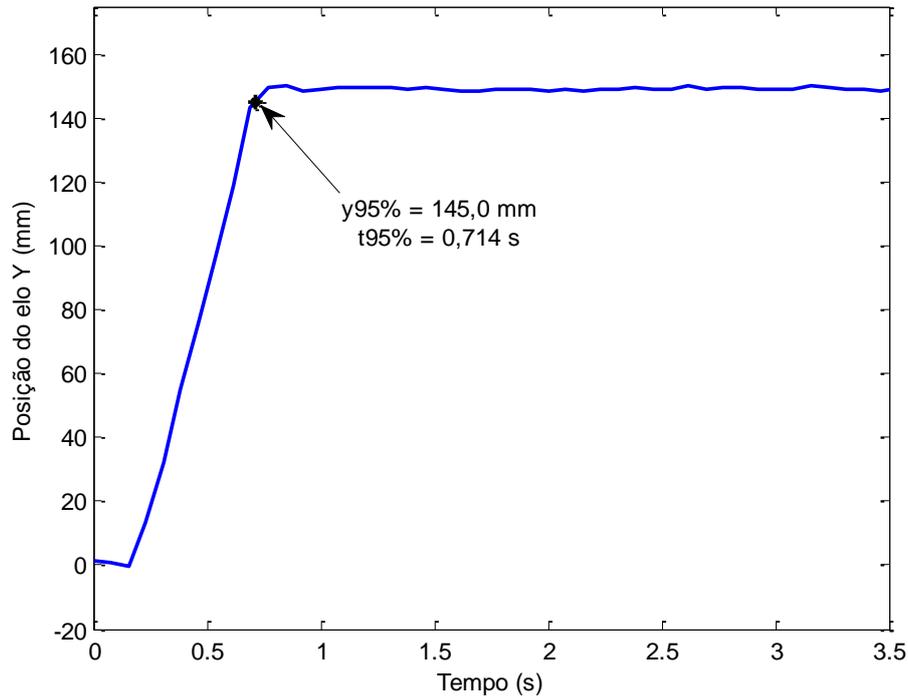


Figura 3.3 – Resposta em malha aberta do elo Y do robô

A partir dos resultados indicados nas curvas das Fig. (3.1), Fig. (3.2) e Fig. (3.3) e utilizando o critério de Isermann, para a determinação do tempo de amostragem dado pela Eq. (3.7), chega-se a um intervalo comum para os três elos, dado por:  $47,6 \text{ ms} \leq t_a \leq 142 \text{ ms}$ . Optou-se em utilizar  $t_a = 140 \text{ ms}$ .

### 3.5 ESCOLHA DO SINAL DE EXCITAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO

Deve-se escolher um sinal de excitação que demonstre toda a dinâmica do sistema e que minimize erros de modelagem com relação ao ruído (ISERMANN, 1980). Para o sistema em questão escolheu-se usar sequências de pulsos construídas de tal forma que as válvulas sofressem variações em torno de sua posição central e que os pistões efetuassem percursos com movimentos de avanços e retornos. As Fig. (3.4), Fig. (3.5) e Fig. (3.6) mostram as excitações escolhidas para cada elo do robô.

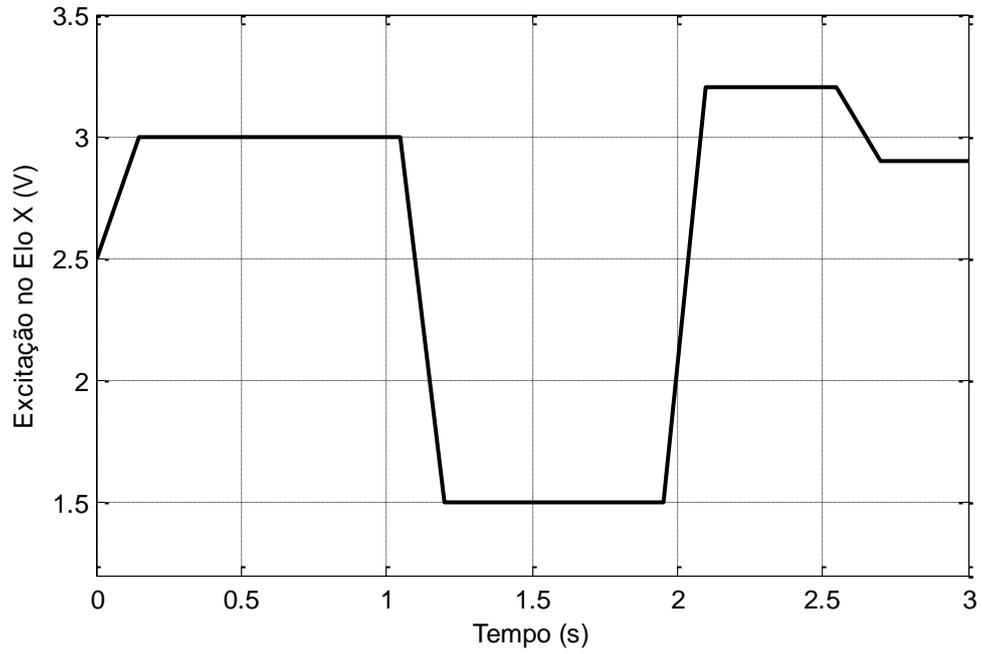


Figura 3.4 – Sinal de excitação do elo X

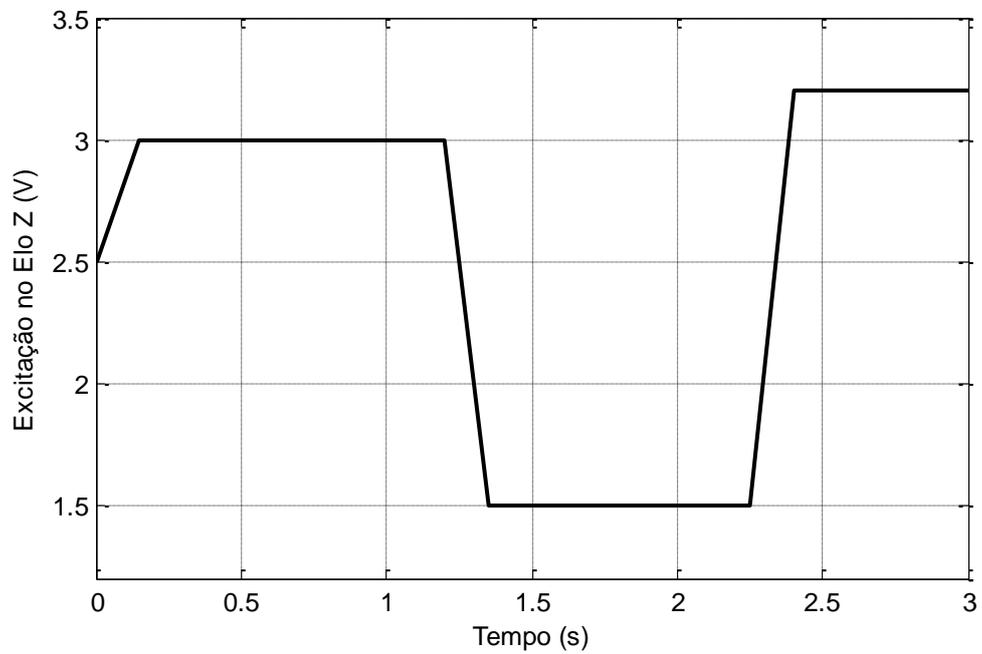


Figura 3.5 – Sinal de excitação do elo Z

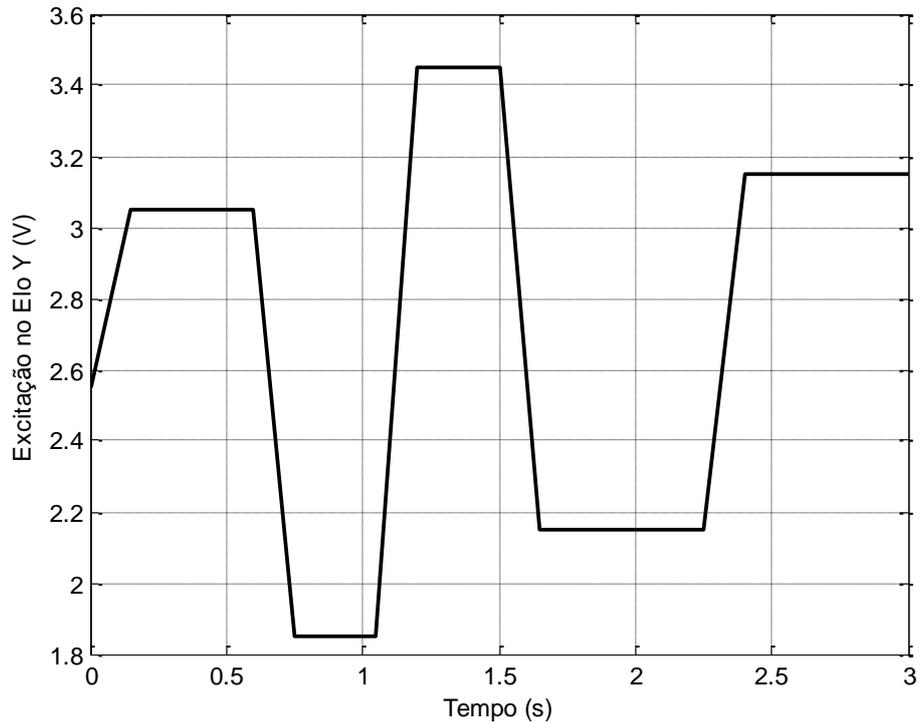


Figura 3.6 – Sinal de excitação do elo Y

### 3.6 ESCOLHA DA ORDEM DO MODELO

Se a ordem usada para o modelo for muito menor do que a ordem efetiva do sistema real, o modelo não possuirá a complexidade estrutural necessária para reproduzir a dinâmica do sistema. Por outro lado, se a ordem do modelo for muito maior do que a necessária, a estimação de parâmetros será provavelmente mal condicionada, ocasionando cancelamento de pólos e zeros na função de transferência do sistema (AGUIRRE, 2007b).

Neste trabalho utilizou-se o somatório do erro quadrático (*SEQ*) dado pela Eq. (3.8), o coeficiente de correlação múltipla  $R^2$  dado pela Eq. (3.9) e o critério de informação de Akaike (*AIC*) dado pelo Eq. (3.10), para definição da estrutura do modelo ARX para os elos do robô.

$$SEQ = \sum_{k=1}^N \rho(k) - \hat{\rho}(k)^2 \quad (3.8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N \rho(k) - \hat{\rho}(k)^2}{\sum_{k=1}^N \rho(k) - \bar{\rho}^2} \quad (3.9)$$

$$AIC = N \ln \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho(k) - \hat{\rho}(k)^2 \right] + 2n_p \quad (3.10)$$

onde:  $N$  é o número de amostras do experimento e  $n_p$  é o numero de parâmetros estimados.

Quando a ordem do modelo utilizado na estimação dos parâmetros é aumentada o  $SEQ$  diminui à medida que se obtém um melhor ajuste (COELHO e COELHO, 2004). Porém quando a diminuição do  $SEQ$  é pequena para modelos de ordem superior em comparação a modelos de ordem menor, não há necessidade de se utilizar modelos de ordem elevada por ser insignificante a diferença.

Quando o valor de  $R^2$  é igual 1 indica uma exata adequação do modelo para os dados medidos e para valores entre 0,9 e 1 pode o modelo ser considerado suficiente para muitas aplicações práticas em identificação e controle (COELHO e COELHO, 2004).

Na escolha da estrutura do modelo utilizando o critério de Akaike ( $AIC$ ) escolhe-se inicialmente um modelo de ordem baixa (ordem 1 por exemplo) e então aumenta-se a ordem do modelo avaliando o  $AIC$  para cada incremento na ordem do modelo, quando  $AIC$  passar por um mínimo, ou evidenciar um “joelho”, o procedimento pode ser terminado (AGUIRRE, 2007b).

### 3.6.1 RESULTADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DA ORDEM DO MODELO

Excitou-se o sistema com os sinais mostrados na seção 3.5, armazenando todos os dados das excitações e das respostas obtidas a um tempo de amostragem de 140 ms (determinado na seção 3.4), em seguida, de posse desses dados, desenvolveu-se um programa computacional nas plataformas LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup>, com as Eq. (3.2) e Eq. (3.3), com o MQR dado pelas Eq. (3.4), Eq. (3.5) e Eq. (3.6) e os índices dados pelas

Eq. (3.8), Eq. (3.9) e Eq. (3.10), e variando-se  $n_a$ ,  $n_b$  e  $d$ , de cada elo do robô, considerando inicialmente os parâmetros dos modelos nulos, matrizes de covariância igual a matriz identidade com dimensão igual ao número de parâmetros do modelo multiplicada por  $10^4$  e fator de esquecimento  $\lambda=1$ , obteve-se os modelos e os índices apresentados nas Tab (3.1), Tab (3.2) e Tab (3.3), para os elos X, Z e Y, respectivamente.

Tabela 3.1 – Índices de desempenho dos modelos do elo X

<b>Modelo</b>	$n_a$	$n_b$	$d$	$n_p$	<b>SEQ</b>	$R^2$	<b>AIC</b>
Modelo 1	1	0	1	2	1,7599705533	0,9584791869	-44,60870391
Modelo 2	2	0	1	3	0,5145142169	0,9878617011	-67,20528731
Modelo 3	2	0	2	3	0,1513032373	0,9964304895	-91,68403071
Modelo 4	2	1	1	4	0,0333636715	0,9992128921	-119,9203985
Modelo 5	3	0	1	4	0,3864654090	0,9908825986	-70,92890373
Modelo 6	3	0	2	4	0,1160631510	0,9972618653	-94,98706209
Modelo 7	3	0	3	4	0,2997804733	0,9929276493	-76,00874203
Modelo 8	3	1	1	5	0,0290256220	0,9993152343	-120,7061719
Modelo 9	3	1	2	5	0,0840910637	0,9980161433	-99,43174499
Modelo 10	3	2	1	6	0,0154140555	0,9996363552	-131,3641552

Tabela 3.2 – Índices de desempenho dos modelos do elo Z

	$n_a$	$n_b$	$d$	$n_p$	<b>SEQ</b>	$R^2$	<b>AIC</b>
Modelo 1	1	0	1	2	0,9241537663	0,9542109131	-57,49218162
Modelo 2	2	0	1	3	0,1884987014	0,9906604466	-87,28792869
Modelo 3	2	0	2	3	0,0728879158	0,9963886193	-106,2912938
Modelo 4	2	1	1	4	0,0368302274	0,9981751711	-117,9433729
Modelo 5	3	0	1	4	0,1399007153	0,9930683332	-91,25109116
Modelo 6	3	0	2	4	0,0454800434	0,9977465983	-113,7242786
Modelo 7	3	0	3	4	0,1879762205	0,9906863340	-85,34344169
Modelo 8	3	1	1	5	0,0299444883	0,9985163391	-118,0828455
Modelo 9	3	1	2	5	0,0472462267	0,9976590891	-110,9622952
Modelo 10	3	2	1	6	0,0288404091	0,9985710430	-120,8342011

Tabela 3.3 – Índices de desempenho dos modelos do elo Y

	$n_a$	$n_b$	$d$	$n_p$	$SEQ$	$R^2$	$AIC$
Modelo 1	1	0	1	2	4,7972738401	0,9009086417	-24,55368934
Modelo 2	2	0	1	3	0,9620509955	0,9801281013	-54,68840187
Modelo 3	2	0	2	3	3,0334134411	0,9373425266	-31,7208748
Modelo 4	2	1	1	4	0,3219338185	0,9933502109	-74,58283121
Modelo 5	3	0	1	4	0,4732977196	0,9902236738	-66,87525868
Modelo 6	3	0	2	4	2,3395538364	0,9516747271	-34,91544061
Modelo 7	3	0	3	4	2,0759201996	0,9571202814	-37,30655497
Modelo 8	3	1	1	5	0,2864844761	0,9940824442	-74,91606405
Modelo 9	3	1	2	5	2,1407544387	0,9557810806	-34,6914793
Modelo 10	3	2	1	6	0,2179752167	0,9954975553	-78,38212362

Escolheu-se dentro dos modelos mostrados nas Tab. (3.1), Tab. (3.2) e Tab. (3.3), de cada elo um modelo de primeira ordem, um de segunda ordem e outro de terceira ordem com o menor  $SEQ$ . Como o modelo 1 era o único de primeira ordem ficou sendo este escolhido para todos os elos, dentre os modelos 2, 3 e 4 que são de segunda ordem escolheu-se o modelo 4 para todos os elos e dentre os modelos 5, 6, 7, 8, 9 e 10 escolheu-se o modelo 10 para todos os elos.

Para analisar a variação do  $SEQ$  construíram-se os gráficos mostrados nas Fig. (3.7), Fig (3.8) e Fig. (3.9) para os elos X, Z e Y respectivamente, utilizando os modelos 1, 4 e 10. Como as curvas dos gráficos são íngremes a esquerda do ponto dos modelos número 4 e suaves a sua direita, esses modelos podem ser considerados suficientes para representarem os três elos.

Analisando-se o  $AIC$  para os elos chega-se a mesma conclusão da análise feita com o  $SEQ$  e verifica-se que o  $R^2$  para o modelo 4 é próximo da unidade, indicando uma boa adequação do modelo para os dados medidos, e conclui-se que estes modelos são adequados para representarem os três elos, sendo eles escolhidos para os projetos dos controladores adaptativos.

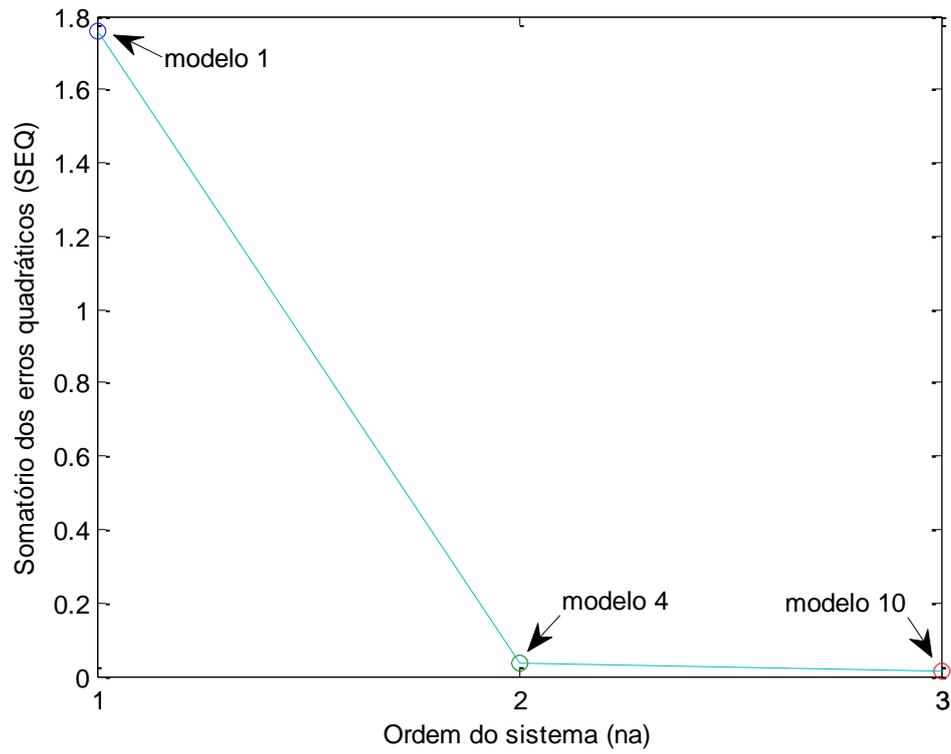


Figura 3.7 – Teste de detecção da ordem do modelo do elo X

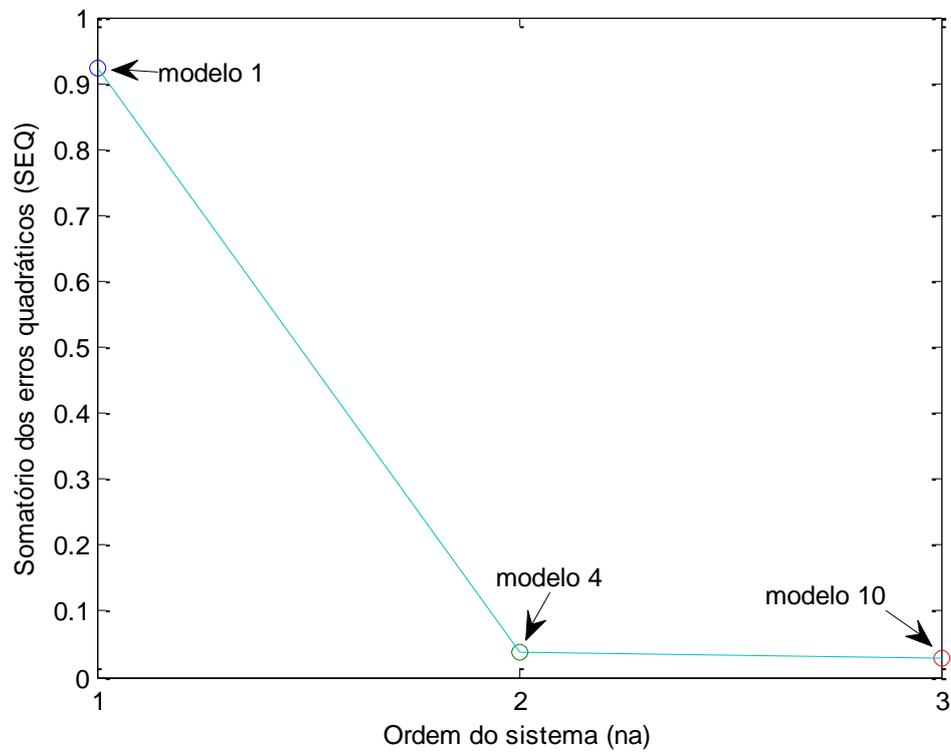


Figura 3.8 – Teste de detecção da ordem do modelo do elo Z

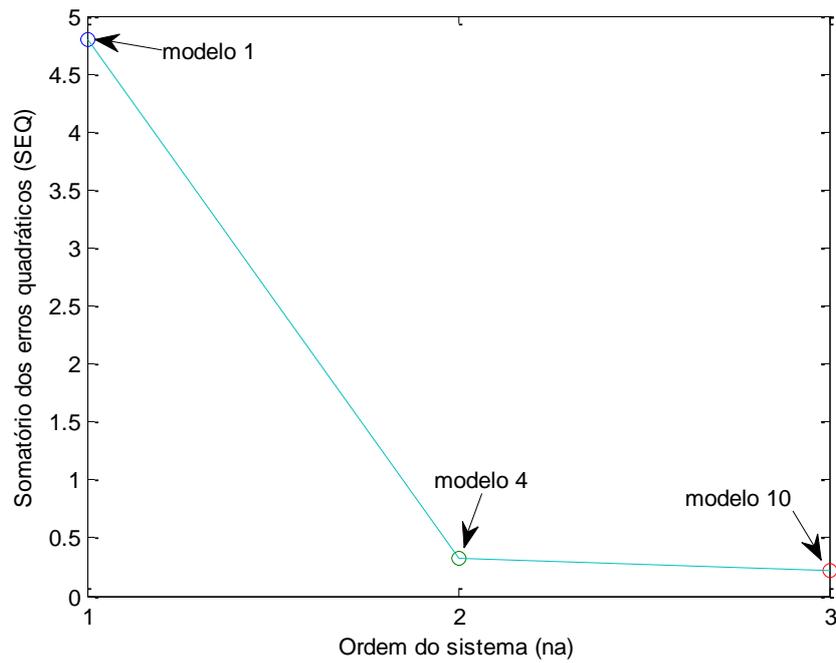


Figura 3.9 – Teste de detecção da ordem do modelo do elo Y

As Fig. (3.10), Fig. (3.11) e Fig. (3.12) mostram respectivamente as comparações das respostas reais e estimadas para os elos X, Z e Y utilizando os modelos escolhidos anteriormente, confirmando que estes modelos estimados realmente demonstram possuir características dinâmicas similares às do sistema real.

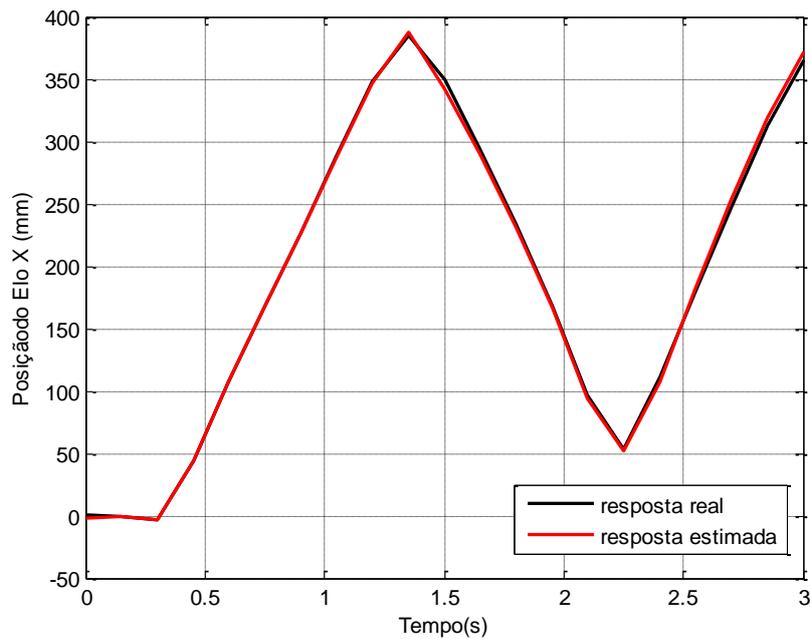


Figura 3.10 – Resposta real e estimada em malha aberta do elo X

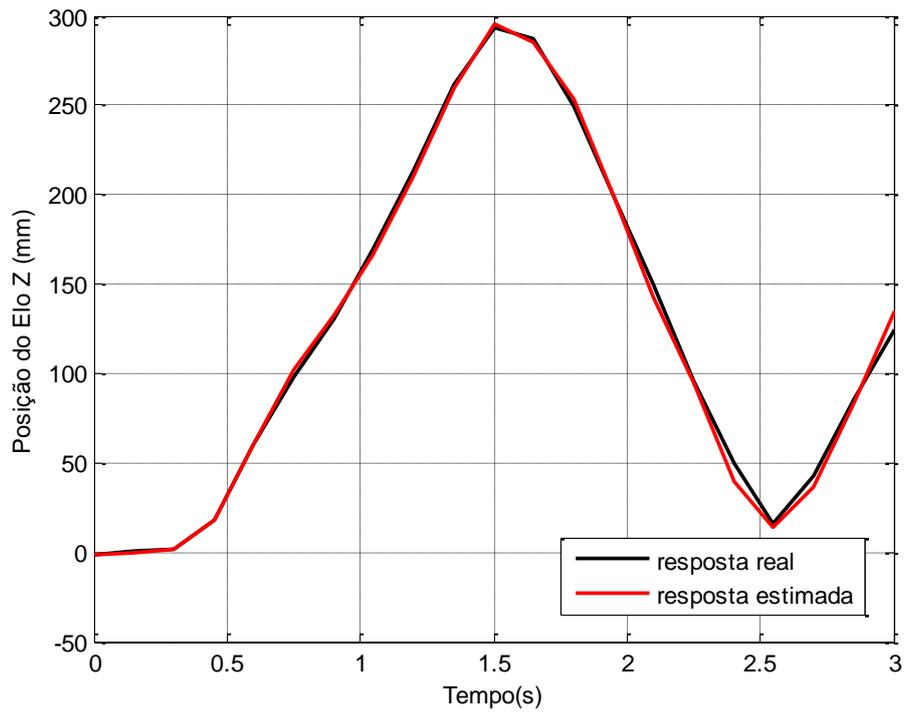


Figura 3.11 – Resposta real e estimada em malha aberta do elo Z

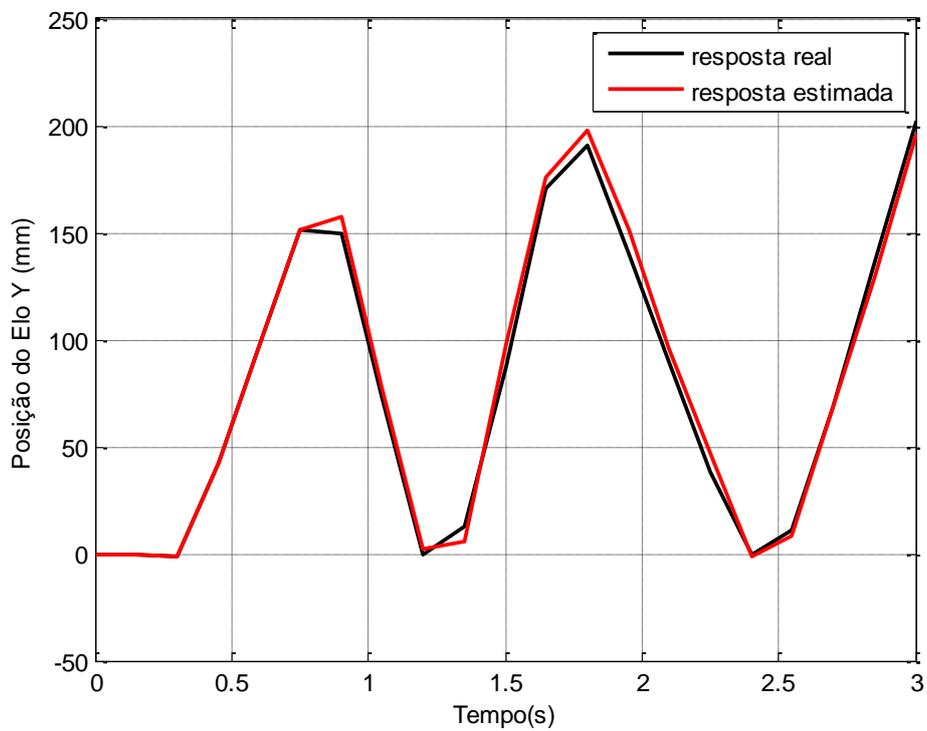


Figura 3.12 – Resposta real e estimada em malha aberta do elo Y

As Fig. (3.13), Fig. (3.14) e Fig. (3.15) mostram respectivamente a evolução dos parâmetros estimados ao longo do tempo do modelo 4 para os eixos X, Z e Y.

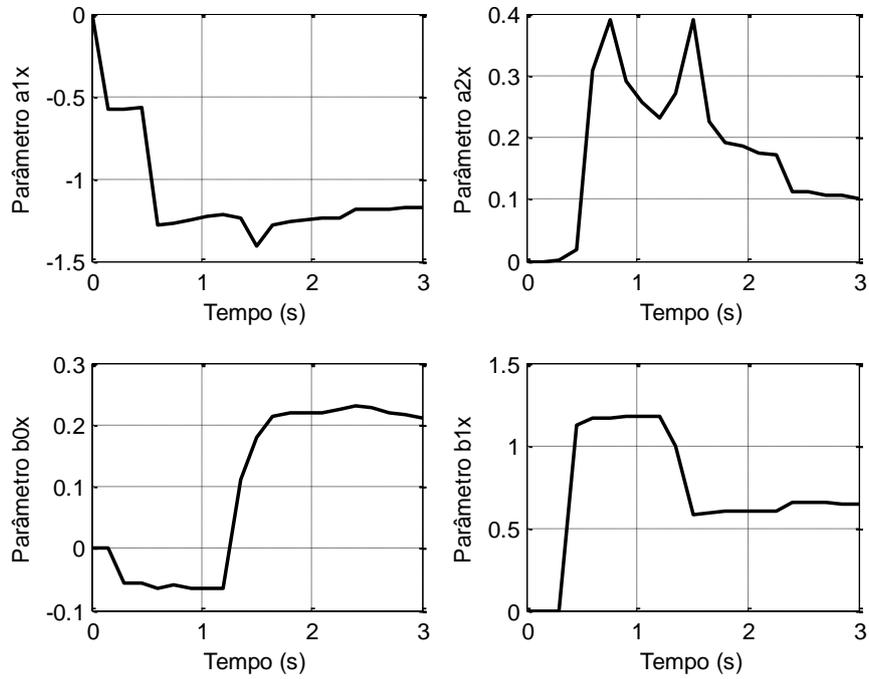


Figura 3.13 – Parâmetros estimados do elo X

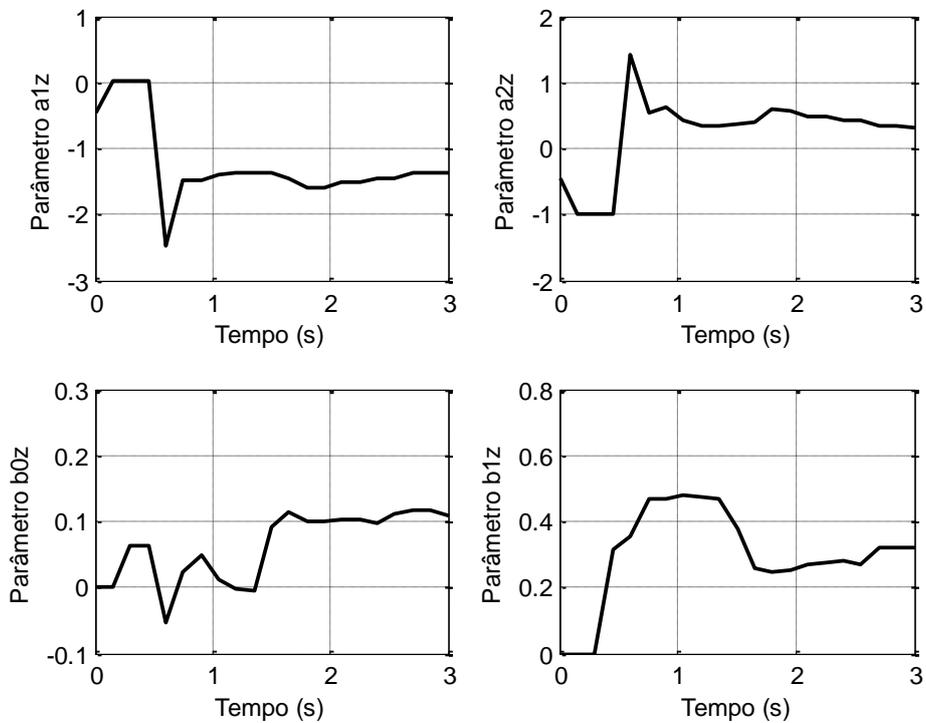


Figura 3.14 – Parâmetros estimados do elo Z

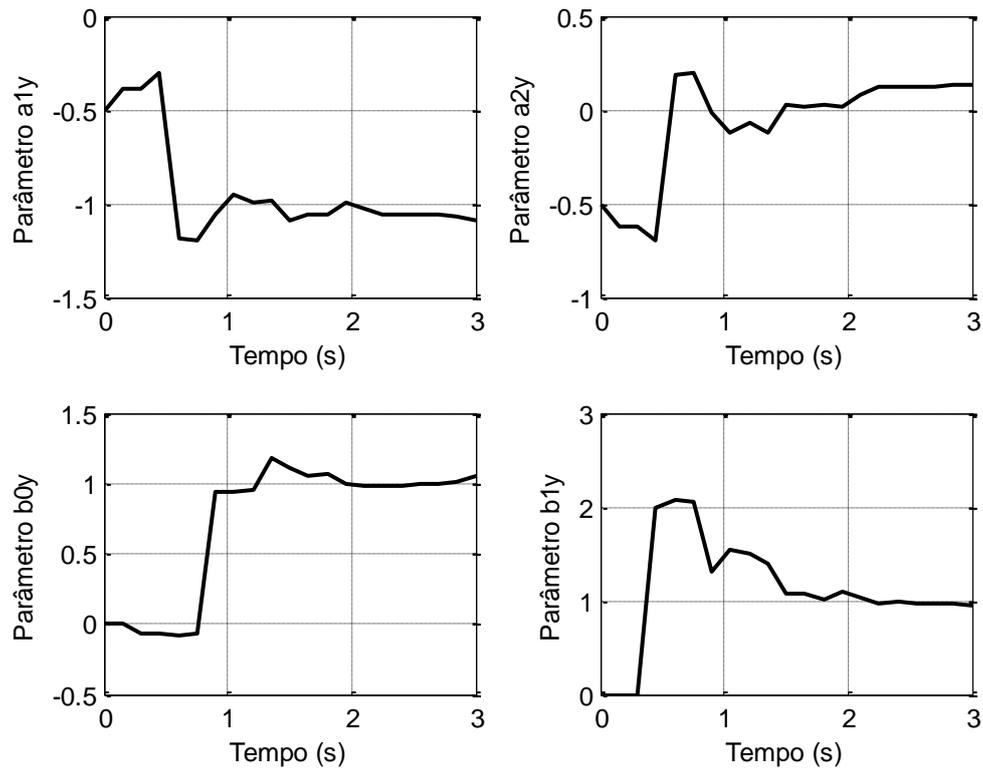


Figura 3.15 – Parâmetros estimados do elo Y

### 3.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se uma metodologia para selecionar o tempo de amostragem, e o tipo de sinal de excitação, a serem utilizados na obtenção dos modelos matemáticos dos elos do robô, através da técnica de identificação paramétrica. Neste caso foram utilizados programas computacionais desenvolvidos na plataforma LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup> usando o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), e foi feito um estudo, tomando como base os índices de desempenho  $SEQ$ ,  $R^2$  e  $AIC$ , para determinar as estruturas dos modelos que melhor representassem a dinâmica de cada elo do robô. Com esses procedimentos determinou-se que os modelos tinham na sua estrutura dois pólos, um zero e um atraso de transporte. Os resultados preliminares demonstram que os mesmos representavam bem as dinâmicas dos elos.

## **CAPÍTULO IV**

### **CONTROLE ADAPTATIVO DO SISTEMA**

#### **4.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta o projeto dos controladores adaptativos para os três elos do robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano, assim como os resultados obtidos com o uso deles. A seção 4.2 apresenta uma rápida revisão da teoria de controladores adaptativos. A seção 4.3 apresenta o projeto dos controladores adaptativos para os elos do robô. A seção 4.3.1 apresenta os resultados obtidos utilizando os controladores projetados. E a seção 4.4 apresenta a conclusão do capítulo.

#### **4.2 CONTROLADORES ADAPTATIVOS**

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 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) (AGUIRRE, 2007a).

No enfoque de Escalonamento de Ganho (GS), os parâmetros do controlador são ajustados a partir de variáveis auxiliares que se correlacionam com as variações da dinâmica do sistema a ser controlado, sendo então projetados controladores fixos para diversas regiões de operação da planta, dos quais o algoritmo de controle adaptativo seleciona, em função das variáveis auxiliares, qual destes é o mais adequado para cada

região de funcionamento. No enfoque de controle adaptativo por modelo de referência (MRAC), o controlador é ajustado de modo que o sistema sob controle comporte-se de acordo com um modelo de referência que represente a dinâmica desejada do sistema.

Os controladores STR são geralmente desenvolvidos em tempo discreto e são classificados em controle adaptativo indireto (ou explícito), onde os parâmetros do controlador são calculados a partir dos parâmetros identificados do sistema a cada período de amostragem, e controle adaptativo direto (ou implícito), onde os parâmetros do controlador são identificados, a cada período de amostragem, diretamente do sistema. As técnicas de controle STR mais utilizadas são Variância Mínima (MV), Variância Mínima Generalizada (GMV), Controle Preditivo Generalizado (GPC), Alocação de Pólos (PP) e controle Linear Quadrático Gaussiano (LQG) (AGUIRRE, 2007a).

Este trabalho se propôs a utilizar a técnica de controle auto-ajustável de Dahlin Variância Mínima (DMV) com o critério de Favier e Hassani, sugerida por VAZ (1999), uma vez que VAZ mostra ótimos resultados obtidos em simulações utilizando essa técnica em comparação a técnicas de controle adaptativo GMV e DMV. A descrição dessa técnica de controle está apresentada no Apêndice A desta dissertação.

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

Como a dinâmica dos elos do robô é desacoplada, foram projetados três controladores DMV com o critério de Favier e Hassani; um para cada elo. A lei de controle do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani é dada pela Eq. (A.34) para o modelo ARMAX, reescrita aqui conforme Eq. (4.1)

$$u_{\rho}(k) = \frac{C_{\rho}(z^{-1})Q_{\rho}(z^{-1})u_{r\rho}(k) - G_{\rho}(z^{-1})\rho(k) + C_{\rho}(z^{-1})X_{\rho}(z^{-1})w_{\rho}(k)}{B_{\rho}(z^{-1})F_{\rho}(z^{-1}) + C_{\rho}(z^{-1})Q_{\rho}(z^{-1})} \quad (4.1)$$

onde o sub-índice  $\rho$  é igual a x para o controlador do elo X, z para o controlador do elo Z e y para o controlador do elo Y.

Os polinômios  $A_{\rho}(z^{-1})$ ,  $B_{\rho}(z^{-1})$ ,  $C_{\rho}(z^{-1})$ ,  $F_{\rho}(z^{-1})$ ,  $G_{\rho}(z^{-1})$  da Eq.(4.1) são respectivamente dados pelas Eq. (A.1.a), Eq. (A.1.b), Eq. (A.1.c), Eq. (A.4.a) e Eq. (A.4.b). Como o modelo escolhido para representar os elos do robô foi o modelo ARX

com dois pólos ( $n_a = 2$ ), um zero ( $n_b = 1$ ) e um atraso de transporte ( $d = 1$ ), determinado no capítulo III, tem-se:

$$A_\rho(z^{-1}) = 1 + \hat{a}_{1\rho}z^{-1} + \hat{a}_{2\rho}z^{-2} \quad (4.2)$$

$$B_\rho(z^{-1}) = \hat{b}_{0\rho} + \hat{b}_{1\rho}z^{-1} \quad (4.3)$$

$$C_\rho(z^{-1}) = 1 \quad (4.4)$$

$$F_\rho(z^{-1}) = 1 \quad (4.5)$$

$$G_\rho(z^{-1}) = g_{0\rho} + g_{1\rho}z^{-1} \quad (4.6)$$

Os parâmetros dos polinômios  $A_\rho(z^{-1})$  e  $B_\rho(z^{-1})$ , característicos dos modelos dos elos, são estimados pelo o MQR, descrito no capítulo III. Os vetores de parâmetros a serem estimados são mostrado na Eq. (4.7):

$$\hat{\theta}_\rho = [\hat{a}_{1\rho} \quad \hat{a}_{2\rho} \quad \hat{b}_{1\rho} \quad \hat{b}_{2\rho}]^T \quad (4.7)$$

Os polinômios  $X_\rho(z^{-1})$  da Eq. (4.1) são dados conforme Eq. (A.20), reescrita como Eq. (4.8):

$$X_\rho(z^{-1}) = \frac{(1 - p_\rho)}{1 - p_\rho z^{-1}} \quad (4.8)$$

onde  $p_\rho$  são os parâmetros de Dahlin.

Os polinômios  $Q_\rho(z^{-1})$  da Eq. (4.1) são polinômios de projeto, sendo os seus parâmetros ajustados segundo os critérios de projeto desejados.

Os parâmetros dos polinômios  $G_\rho(z^{-1})$  da Eq. (4.1) são determinados a partir da identidade polinômial descrita pela Eq. (A.4), reescrita na Eq. (4.9):

$$C_\rho(z^{-1}) = A_\rho(z^{-1})F_\rho(z^{-1}) + z^{-d}G_\rho(z^{-1}) \quad (4.9)$$

Substituindo as Eq. (4.2), Eq. (4.4), Eq. (4.5) e Eq. (4.6) na Eq. (4.9) sabendo que  $d = 1$  (segundo estrutura definida para o modelo), obtém-se:

$$g_{0\rho} = -\hat{a}_{1\rho} \quad (4.10)$$

$$g_{1\rho} = -\hat{a}_{2\rho} \quad (4.11)$$

As referências para os sinais de controle  $u_{r\rho}(k)$  da Eq. (4.1) são dadas pela Eq. (A.35), reescrita na Eq. (4.12).

$$u_{r\rho}(k) = \frac{C_\rho(1) - G_\rho(1)}{B_\rho(1)F_\rho(1)} w_\rho(k) \quad (4.12)$$

Substituindo as Eq. (4.3), Eq. (4.4), Eq. (4.5) e Eq. (4.6) na Eq. (4.12), têm-se:

$$u_{r\rho}(k) = \frac{1 - g_{0\rho} - g_{1\rho}}{\hat{b}_{0\rho} + \hat{b}_{1\rho}} w_\rho(k) \quad (4.13)$$

Finalmente substituindo as Eq. (4.3), Eq. (4.4), Eq. (4.5), Eq. (4.6) e Eq. (4.8) e o polinômio de projeto  $Q_\rho(z^{-1}) = q_{0\rho} + q_{0\rho}z^{-1}$ , na Eq. (4.1) chegam-se as leis de controle DMV com o critério de Favier e Hassani para os elos do robô, conforme Eq. (4.14).

$$u_\rho(k) = \frac{1}{\hat{b}_{0\rho} + q_{0\rho}} \left\{ (1 - p_\rho)w(k) - g_{0\rho}\rho(k) - (g_{1\rho} - g_{0\rho}p_\rho)\rho(k-1) + \right. \\ \left. + g_{1\rho}p_\rho\rho(k-2) - [\hat{b}_{1\rho} + q_{1\rho} - p_\rho(\hat{b}_{0\rho} + q_{0\rho})]u_\rho(k-1) + \right. \\ \left. + p_\rho(\hat{b}_{1\rho} + q_{1\rho})u_\rho(k-2) + q_{0\rho}u_{r\rho}(k) + \right. \\ \left. + (q_{1\rho} - q_{0\rho}p_\rho)u_{r\rho}(k-1) - q_{1\rho}p_\rho u_{r\rho}(k-2) \right\} \quad (4.14)$$

Os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani são implementados no robô manipulador de 3 GDL cartesiano através de um programa computacional desenvolvido nas plataformas LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup>, funcionando da seguinte forma:

1. O programa realiza a leitura dos dados de entradas e saídas dos elos X, Z e Y do robô e assim compõe os vetores de medidas dados pela Eq. (4.15).

$$\varphi_{\rho}^T(k) = [-\rho(k-1) \quad -\rho(k-2) \quad u(k-1) \quad u(k-2)] \quad (4.15)$$

2. O algoritmo MQR é então utilizado para estimar os parâmetros dos modelos referentes aos três elos a cada período de amostragem utilizando as Eq. (3.4), Eq. (3.5) e Eq. (3.6) considerando inicialmente: parâmetros dos modelos nulos, matrizes de covariância iguais a uma matriz identidade de ordem 4 multiplicada por  $10^4$ , e fator de esquecimento  $\lambda=1$ .
3. Os parâmetros estimados são utilizados nos cálculos: dos parâmetros  $g_{0\rho}$  e  $g_{1\rho}$  usando as Eq.(4.10) e Eq. (4.11), das referências para os sinais de controle usando a Eq. (4.13) e da lei de controle do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani para os elos do robô usando a Eq. (4.14). Porém essa lei de controle só é utilizada após  $t_{kp}$  segundos do início do processo, pois inicialmente os parâmetros estimados não se aproximam dos parâmetros reais, sendo então utilizados controladores proporcionais com ganhos  $K_{pp}$  durante esse tempo para todos os elos. A Fig. (4.3) mostra esquematicamente o sistema de controle realizado.

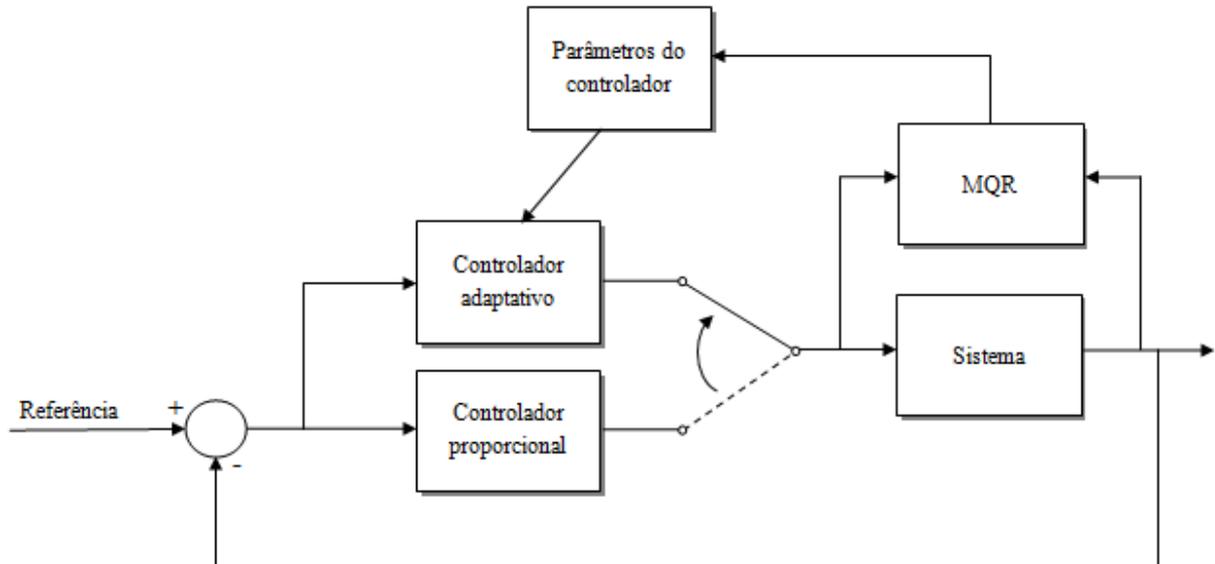


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani

#### 4.4 RESULTADOS OBTIDOS COM O ROBÔ MANIPULADOR SOB A AÇÃO DO CONTROLADOR DMV COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI

Na realização dos experimentos utilizou-se um tempo de amostragem  $t_a = 140$  ms (determinado no capítulo III), considerou-se: como referências, três seqüências de pulsos, uma para cada elo, valores iniciais nulos para os parâmetros dos três elos, fator de esquecimento  $\lambda = 1$  e controladores proporcionais do início até  $t_{kp} = 1,4$  segundos do experimento com ganhos  $K_{px} = K_{pz} = K_{py} = 0,4$ . Consideraram-se como especificações de desempenho para os três elos do robô manipulador: máximo sobre-sinal de 15% e erro em regime permanente de  $\pm 5\%$  depois do primeiro pulso, uma vez que nos pulsos iniciais existem as transições dos controladores proporcionais para os adaptativos e uma baixa aproximação inicial dos parâmetros estimados para os reais.

Diversas variações dos parâmetros de Dahlin  $p_\rho$  e os polinômios  $Q_\rho(z^{-1})$  foram realizadas até se obter as respostas desejadas, como mostra a Tab. (4.1). A seguir são mostrados alguns resultados obtidos com essas variações, assim como a análise dos mesmos.

Tabela 4.1 – Polinômios de ponderação para os testes realizados utilizando os controladores projetados

Teste	$p_x$	$p_z$	$p_y$	$Q_x$	$Q_z$	$Q_y$
1	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,9
2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
3	0,9	0,9	0,9	1,5	1,5	1,5
4	0,9	0,9	0,9	$1,5 - 0,3z^{-1}$	$1,5 - 0,3z^{-1}$	$1,5 - 0,3z^{-1}$
5	0,9	0,9	0,9	$1,5 - 1,1z^{-1}$	$1,5 - 1,1z^{-1}$	$1,5 - 1,1z^{-1}$

⇒ Teste (1)

As Fig. (4.2), Fig. (4.3) e Fig. (4.4) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,1$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ . Neste experimento verificam-se elevados sobre-sinais nas respostas e também algumas oscilações.

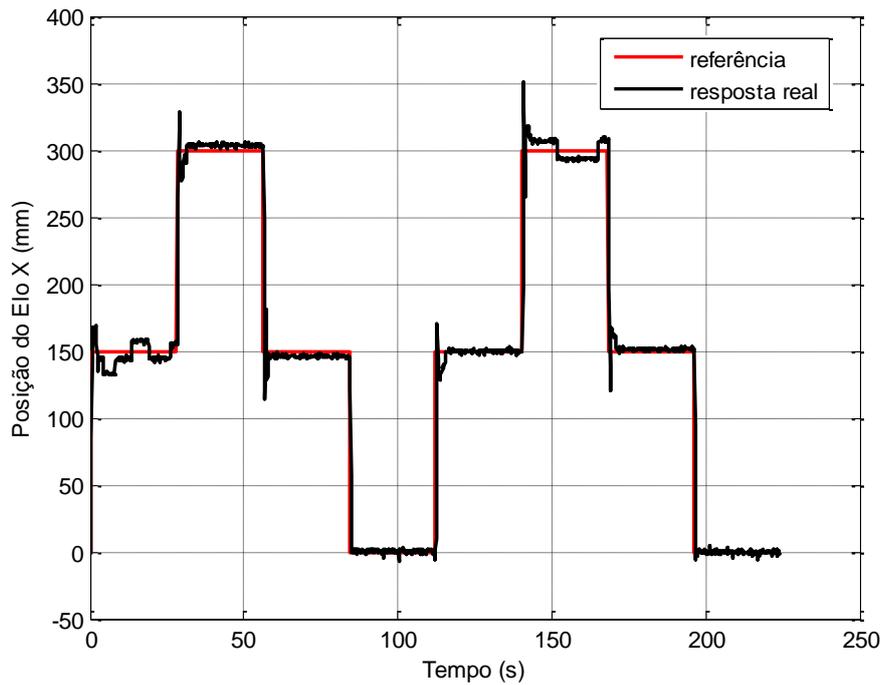


Figura 4.2 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,1$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$

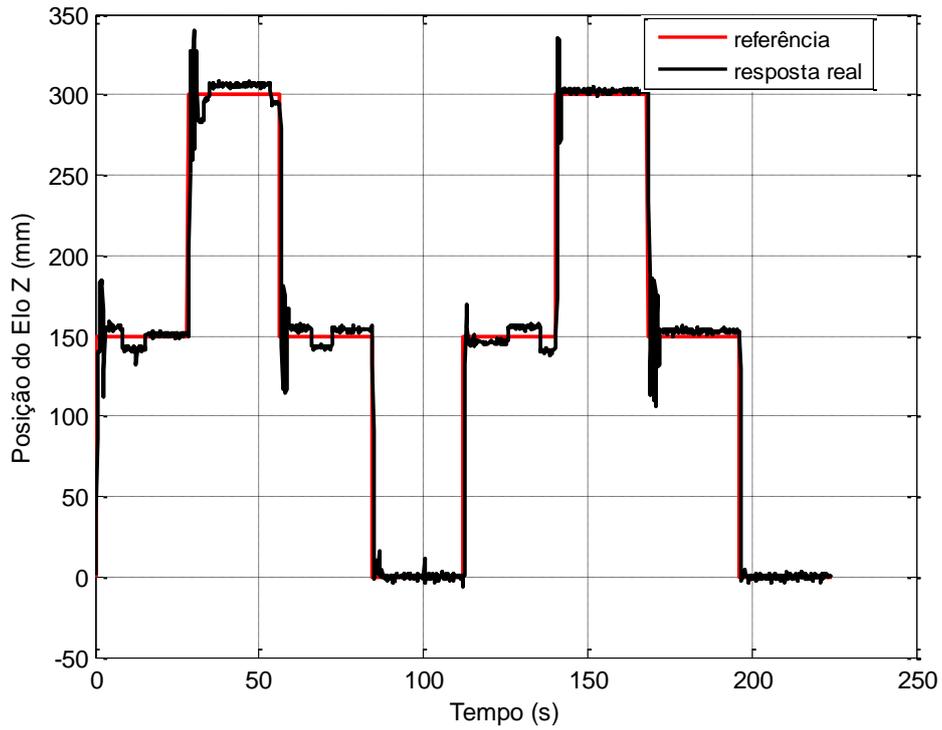


Figura 4.3 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,1$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$$

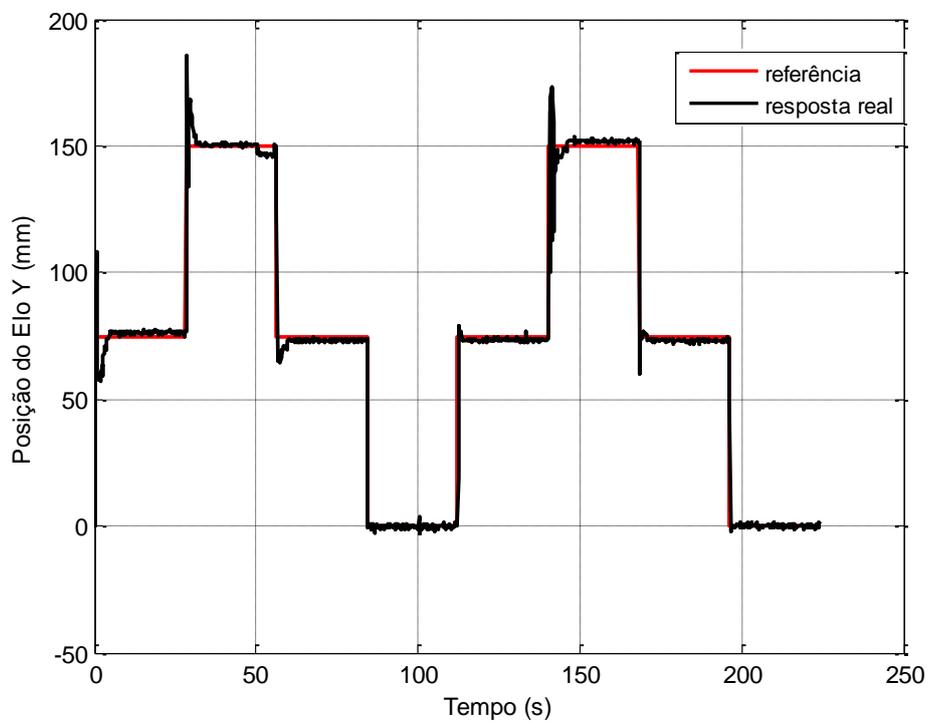


Figura 4.4 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,1$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$$

⇒ Teste (2)

As Fig. (4.5), Fig. (4.6) e Fig. (4.7) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$ . Neste experimento verifica-se em relação ao primeiro teste a diminuição do sobre-sinal, aumento do tempo de estabelecimento e diminuição das oscilações.

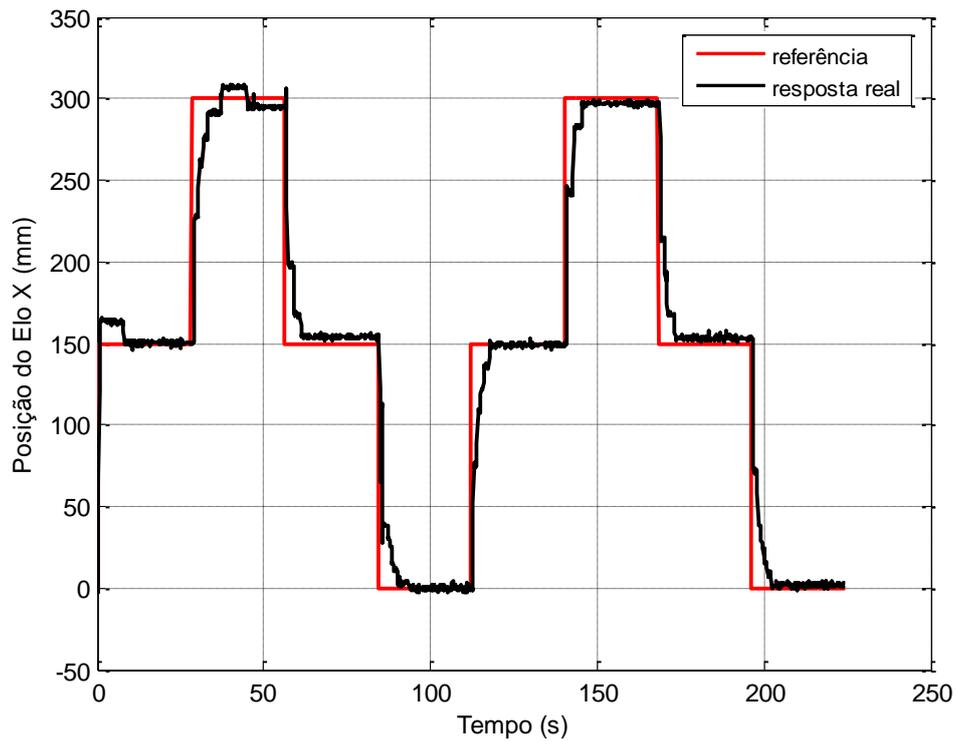


Figura 4.5 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$

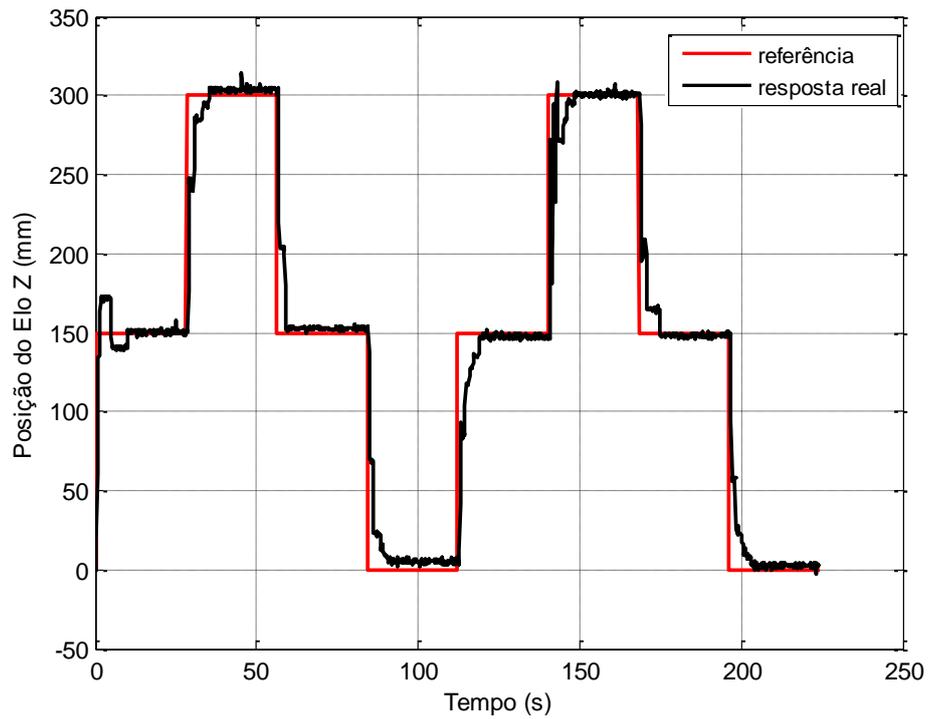


Figura 4.6 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$$

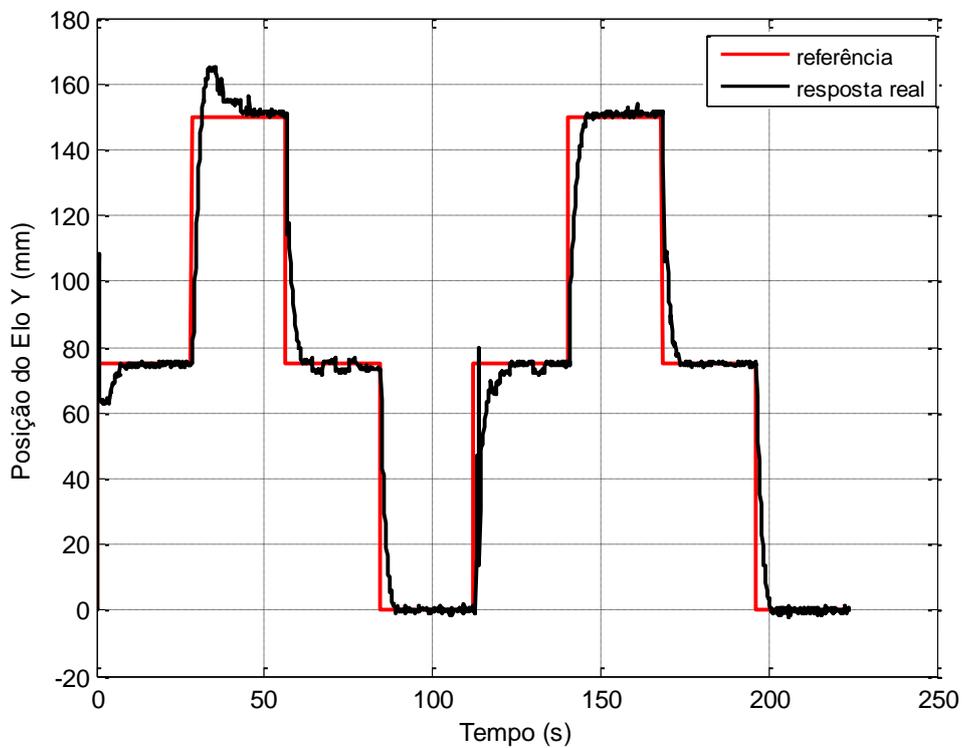


Figura 4.7 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 0,9$$

⇒ Teste (3)

As Fig. (4.8), Fig. (4.9) e Fig. (4.10) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$ . Neste experimento verifica-se em relação ao segundo teste a diminuição das oscilações e o aumento do erro em regime permanente.

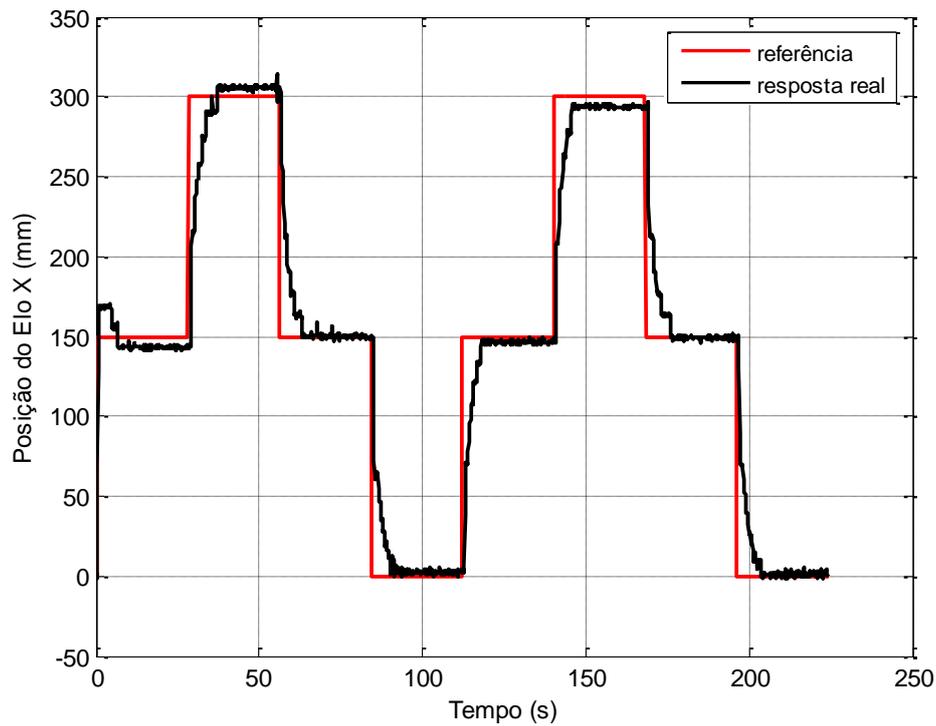


Figura 4.8 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$$

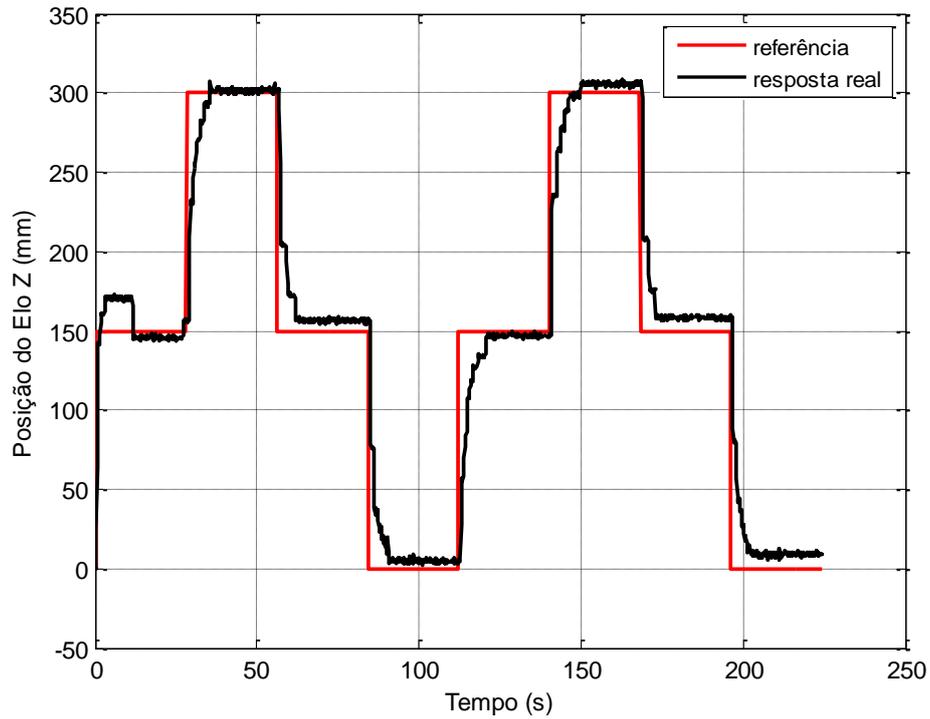


Figura 4.9 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$$

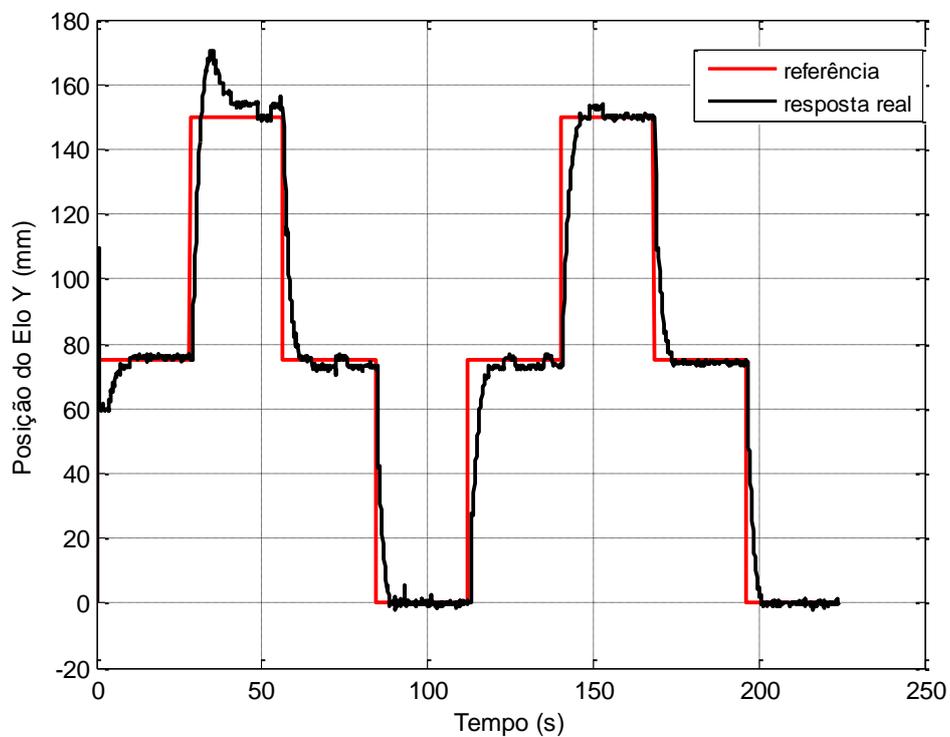


Figura 4.10 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5$$

⇒ Teste (4)

As Fig. (4.11), Fig. (4.12) e Fig. (4.13) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$ . Neste experimento verifica-se que não houve muita mudança em relação ao terceiro teste, sendo apenas percebido um pouco menos de erro em regime permanente.

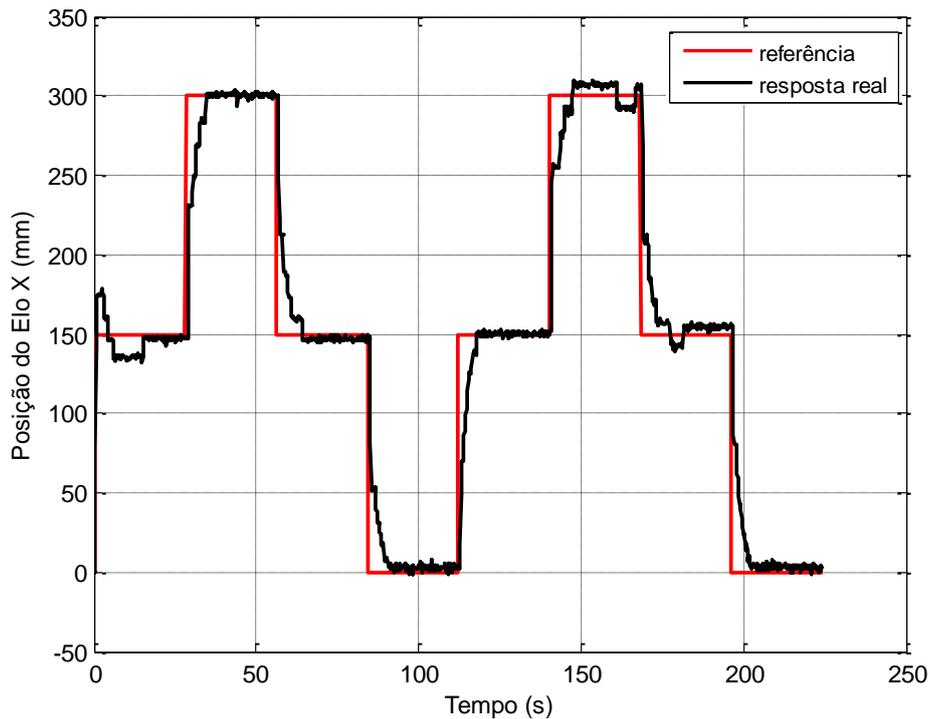


Figura 4.11 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$

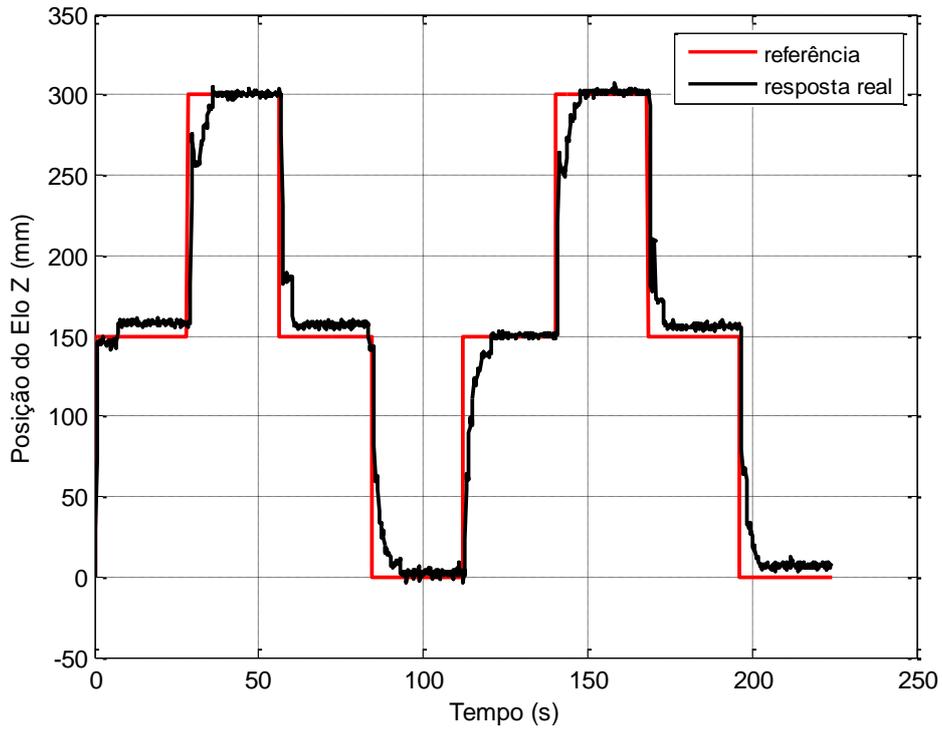


Figura 4.12 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$$

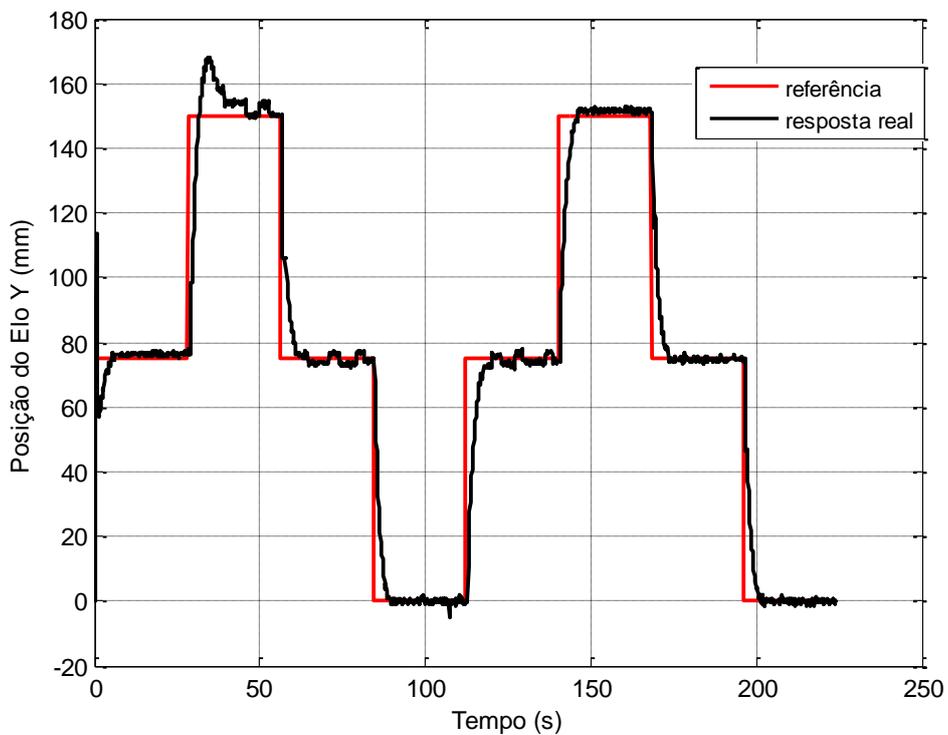


Figura 4.13 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,3z^{-1}$$

⇒ Teste (5)

As Fig. (4.14), Fig. (4.15) e Fig. (4.16) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$ . Neste experimento verifica-se que o sistema se tornou instável apresentando excessivas oscilações.

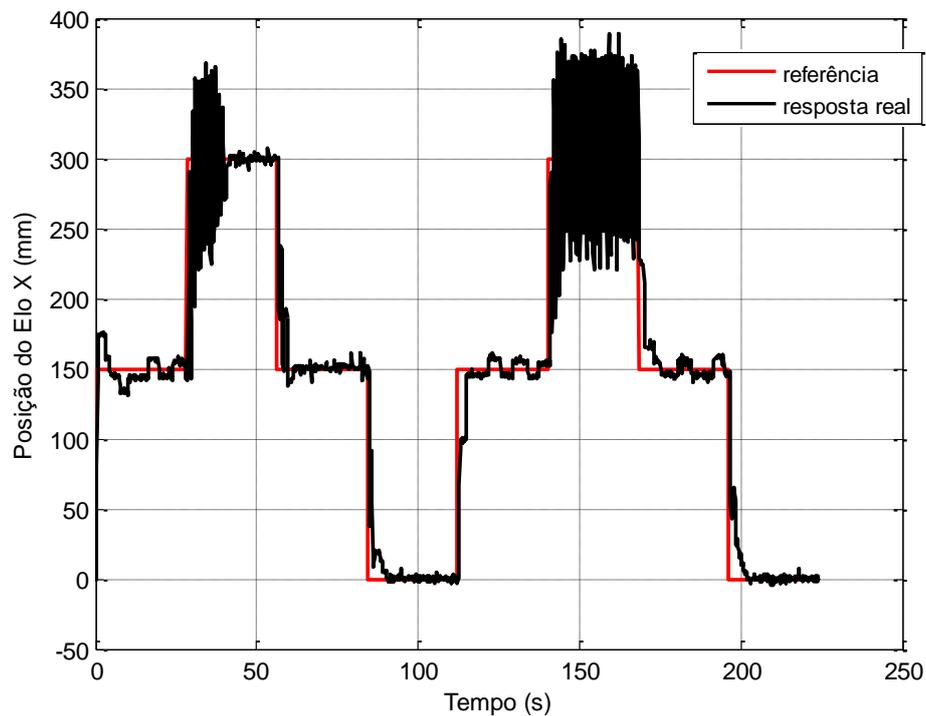


Figura 4.14 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e  $Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$

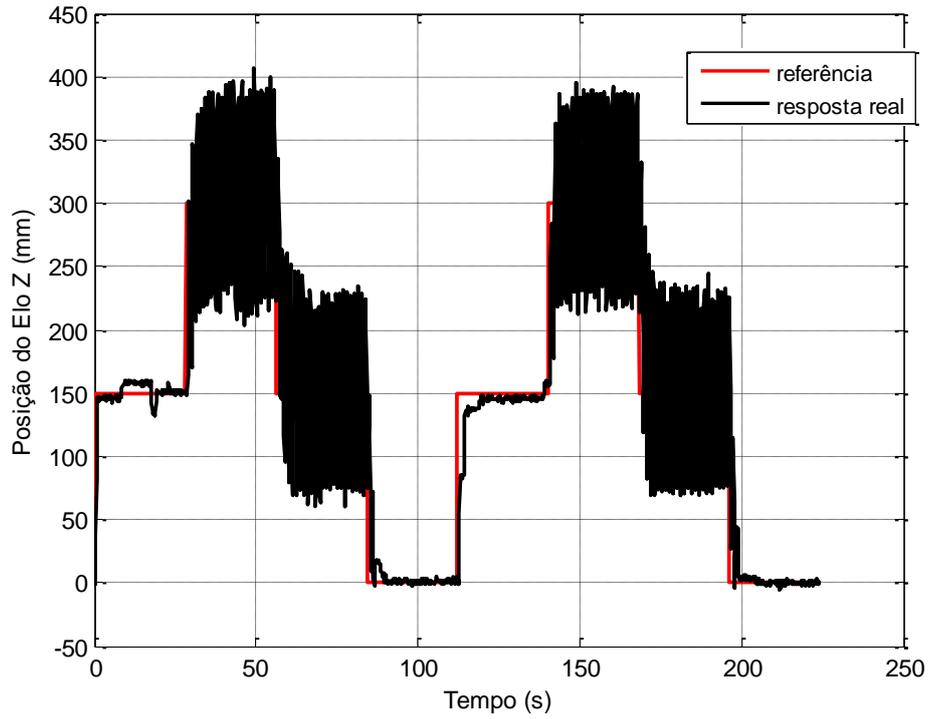


Figura 4.15 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$$

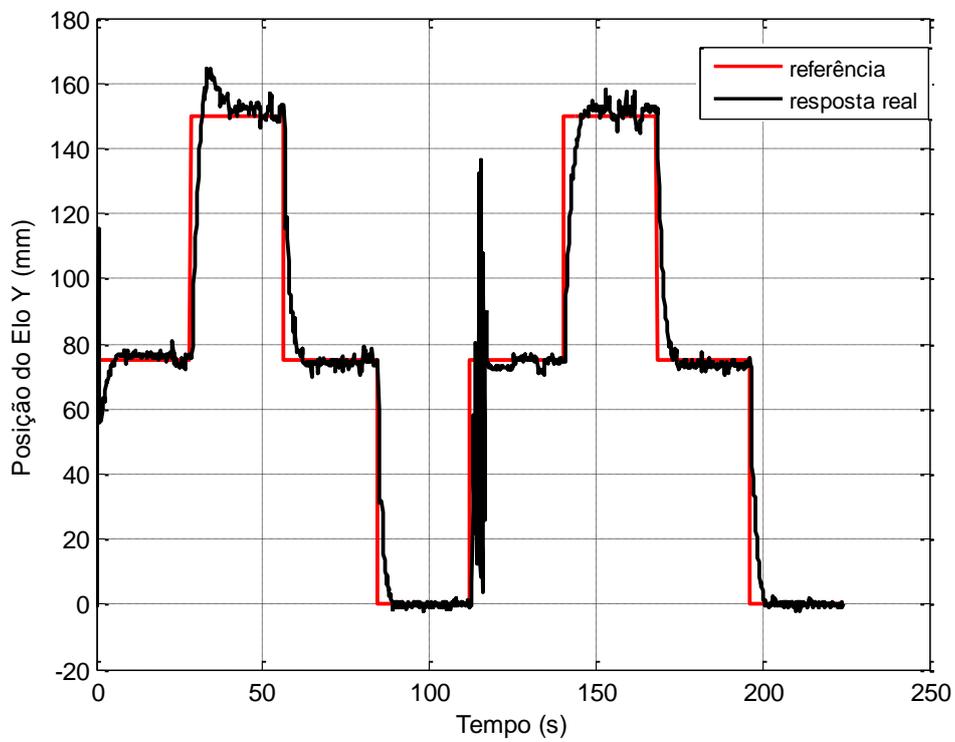


Figura 4.16 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = p_y = 0,9$  e

$$Q_x(z^{-1}) = Q_z(z^{-1}) = Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 1,1z^{-1}$$

Após outros testes tomando como base os mostrados anteriormente, chegou-se as respostas satisfatórias tendo em vista as especificações de desempenho impostas aos elos do robô, utilizando-se  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ . As Fig. (4.17), Fig. (4.18) e Fig. (4.19) mostram respectivamente as referências e as respostas reais dos elos X, Z e Y do robô usando os controladores DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando os valores de  $p_\rho$  e  $Q_\rho(z^{-1})$  mostrados acima.

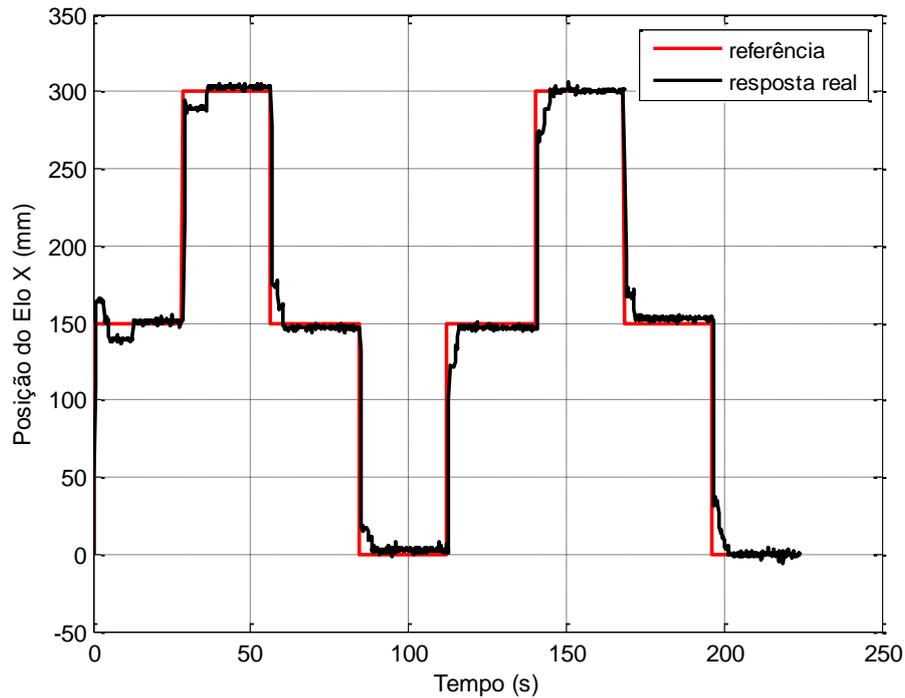


Figura 4.17 – Referência e resposta real do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

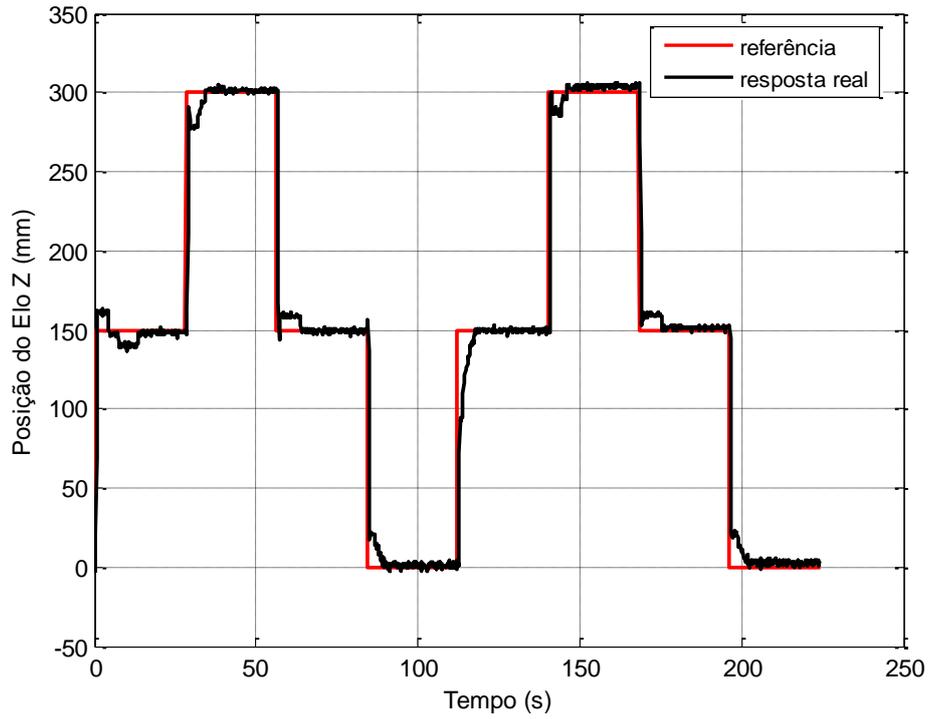


Figura 4.18 – Referência e resposta real do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

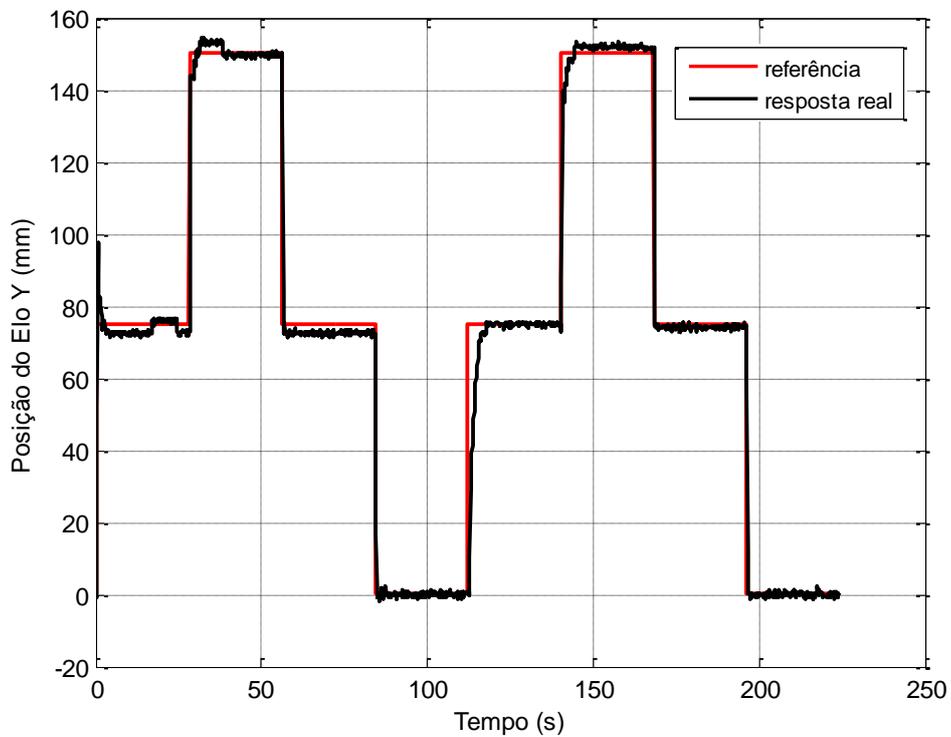


Figura 4.19 – Referência e resposta real do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

As Tab. (4.2), Tab. (4.3) e Tab. (4.4) mostram em valor numérico o desempenho obtido com os elos X, Z e Y, respectivamente, sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .

Tabela 4.2 – Desempenho obtido com o elo X sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

<b>Intervalo (s)</b>	<b>Referência (mm)</b>	<b>Tempo de acomodação (s)</b>	<b>Erro em regime permanente (%)</b>	<b>Máximo sobre-sinal (%)</b>
0 a 28	150	12,8	0,67	10,33
28 a 56	300	8,1	2	*
56 a 84	150	4,2	2,13	*
84 a 112	0	4,3	2,13	*
112 a 140	150	3,8	2	*
140 a 168	300	4,5	0,4	*
168 a 196	150	3,8	2	*
196 a 224	0	5,1	0	*

\* Sem sobre-sinal

Tabela 4.3 – Desempenho obtido com o elo Z sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

<b>Intervalo (s)</b>	<b>Referência (mm)</b>	<b>Tempo de acomodação (s)</b>	<b>Erro em regime permanente (%)</b>	<b>Máximo sobre-sinal (%)</b>
0 a 28	150	13,6	1,33	8
28 a 56	300	6,6	1	*
56 a 84	150	7,7	0,67	*
84 a 112	0	6,6	1	*
112 a 140	150	5,4	0,33	*
140 a 168	300	5,8	2,33	*
168 a 196	150	7,3	1	*
196 a 224	0	6,1	2	*

\* Sem sobre-sinal

Tabela 4.4 – Desempenho obtido com o elo Y sob a ação do controlador DMV com o critério de Favier e Hassani utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

Intervalo (s)	Referência (mm)	Tempo de acomodação (s)	Erro em regime permanente (%)	Máximo sobre-sinal (%)
0 a 28	75	5	3,33	29,87
28 a 56	150	10	0,53	4,67
56 a 84	75	0,8	3,33	*
84 a 112	0	0,7	0	*
112 a 140	75	5,8	0	*
140 a 168	150	4,3	2,67	*
168 a 196	75	0,5	1,07	*
196 a 224	0	1,3	0	*

\* Sem sobre-sinal

As Fig. (4.20), Fig. (4.21) e Fig. (4.22) mostram respectivamente as variáveis de controle dos elos X, Z e Y utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .

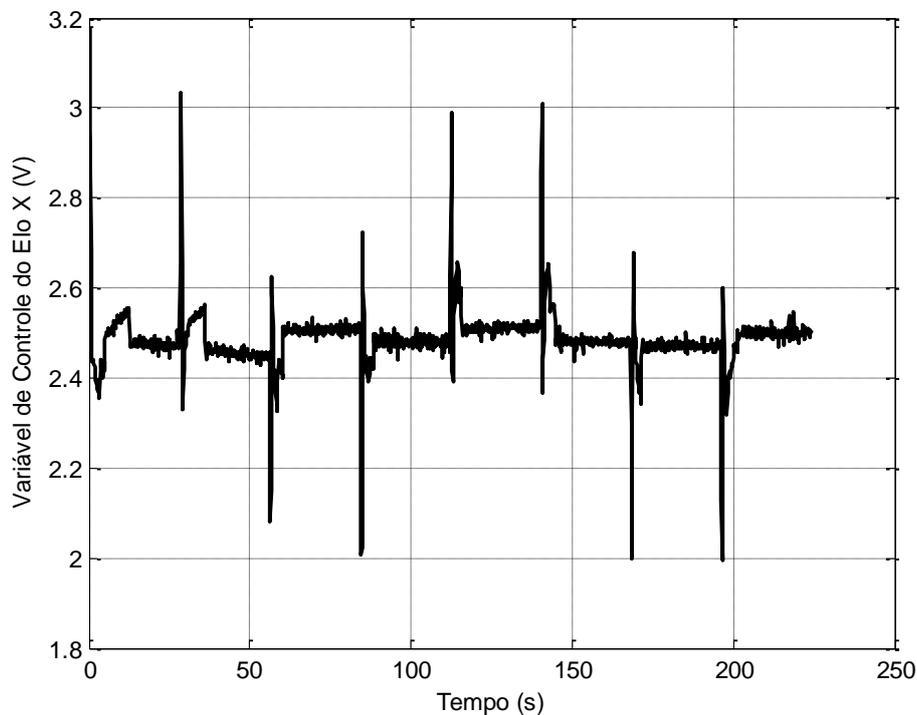


Figura 4.20 – Variável de controle do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

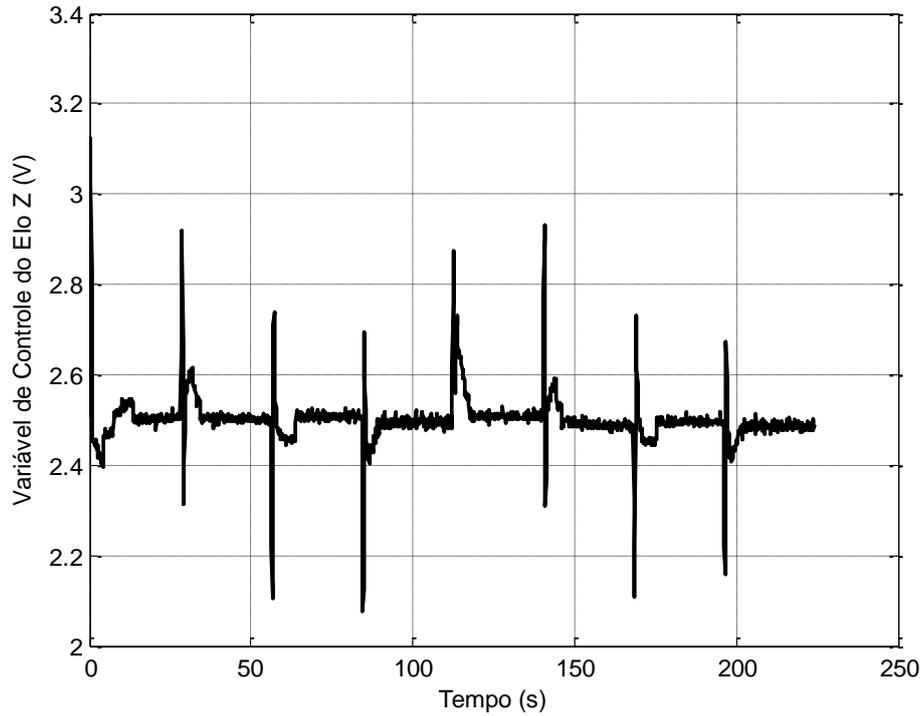


Figura 4.21 – Variável de controle do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

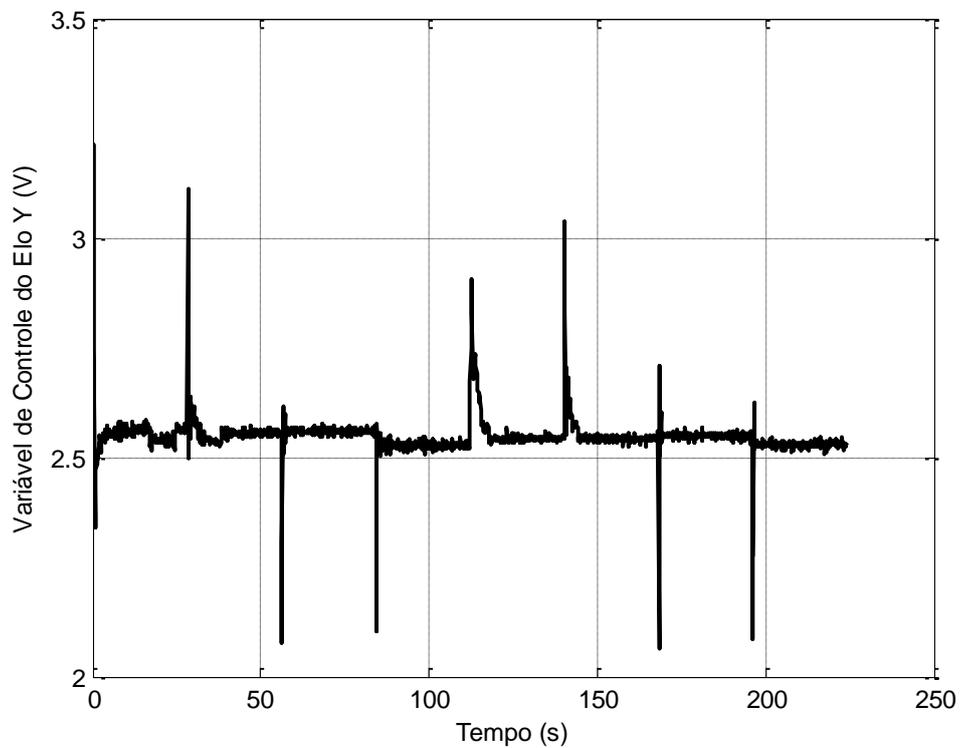


Figura 4.22 – Variável de controle do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

As Fig. (4.23), Fig. (4.24) e Fig. (4.25) mostram respectivamente os erros de saída dos elos X, Z e Y utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .

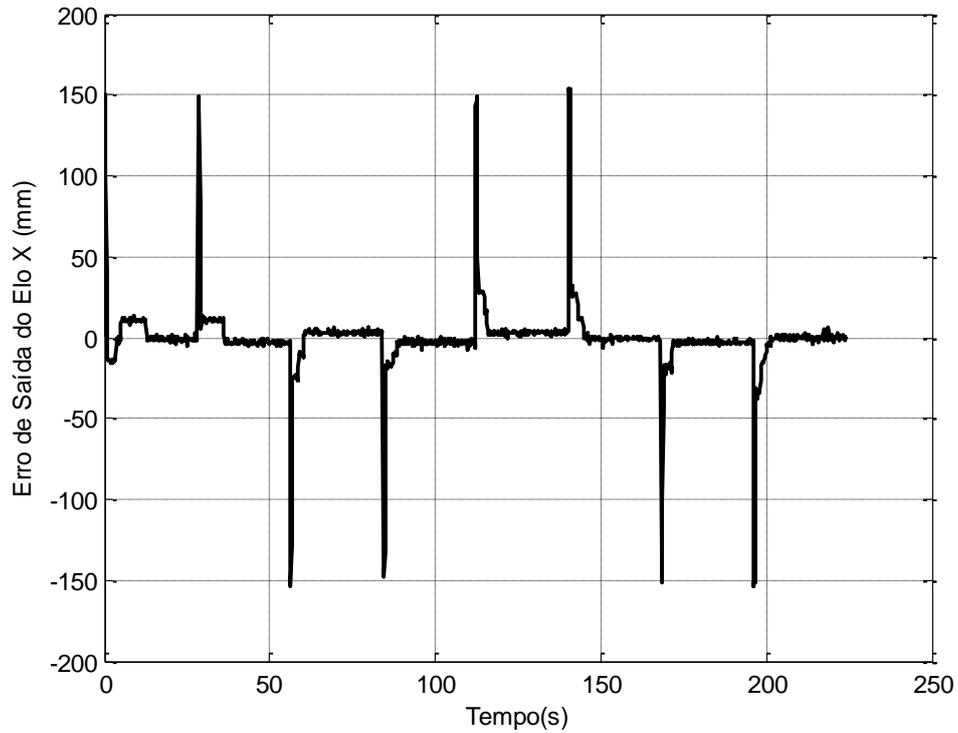


Figura 4.23 – Erro de saída do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  
 $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$

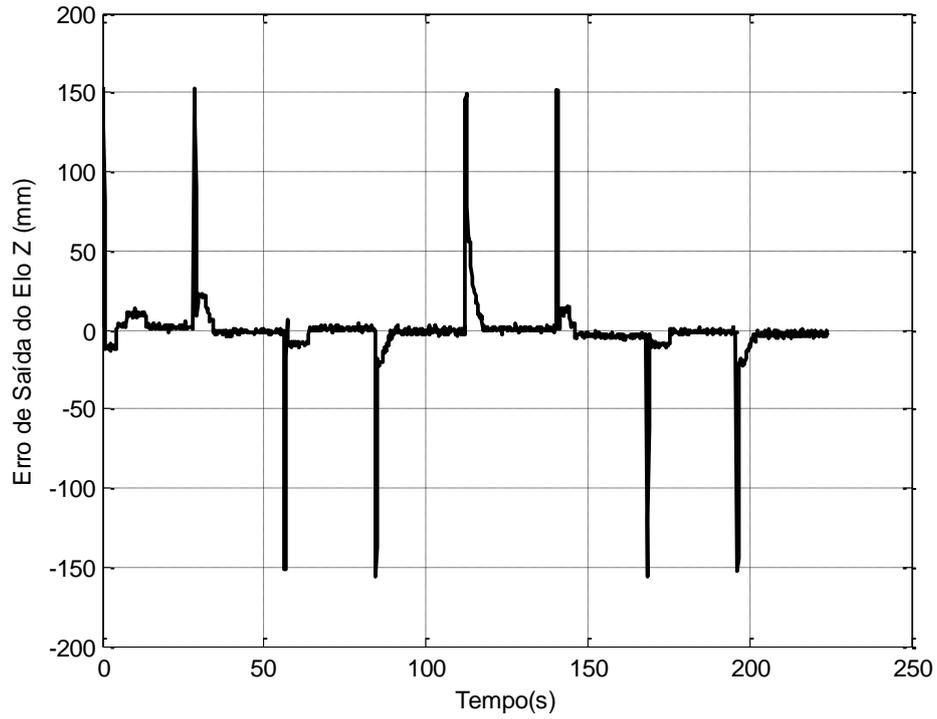


Figura 4.24 – Erro de saída do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

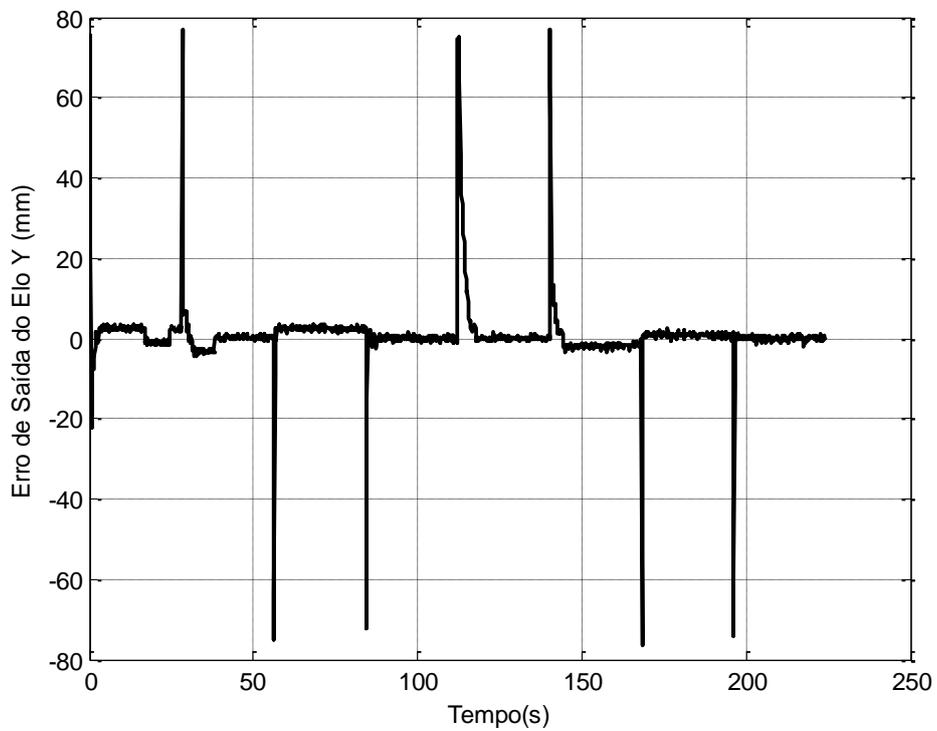


Figura 4.25 – Erro de saída do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,1$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

As Fig. (4.26), Fig. (4.27) e Fig. (4.28) mostram respectivamente os parâmetros estimados dos elos X, Z e Y do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$ .

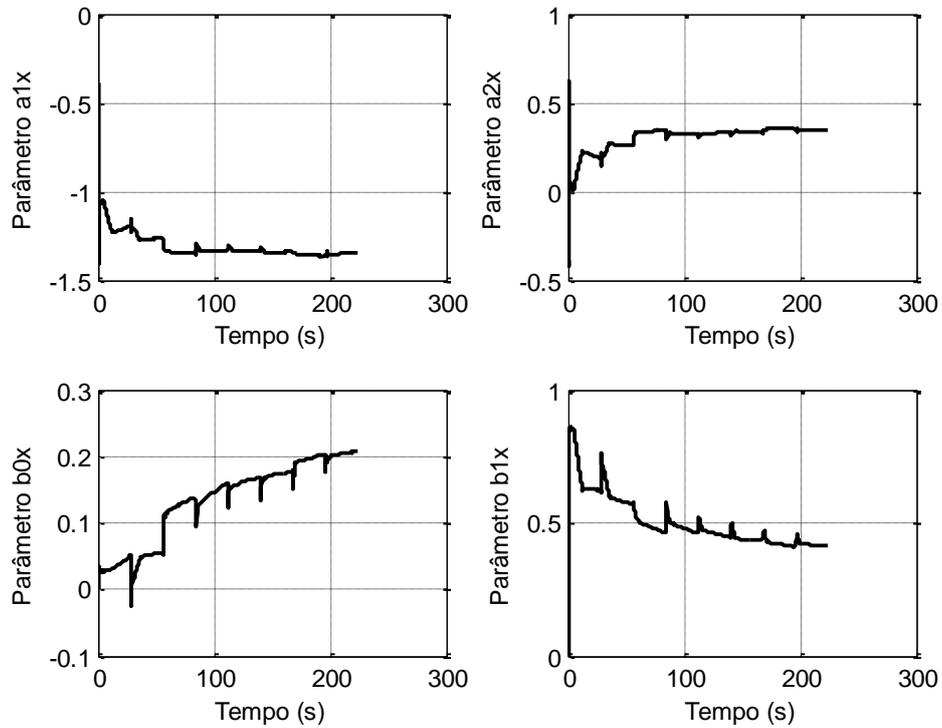


Figura 4.26 – Parâmetros estimados do elo X do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

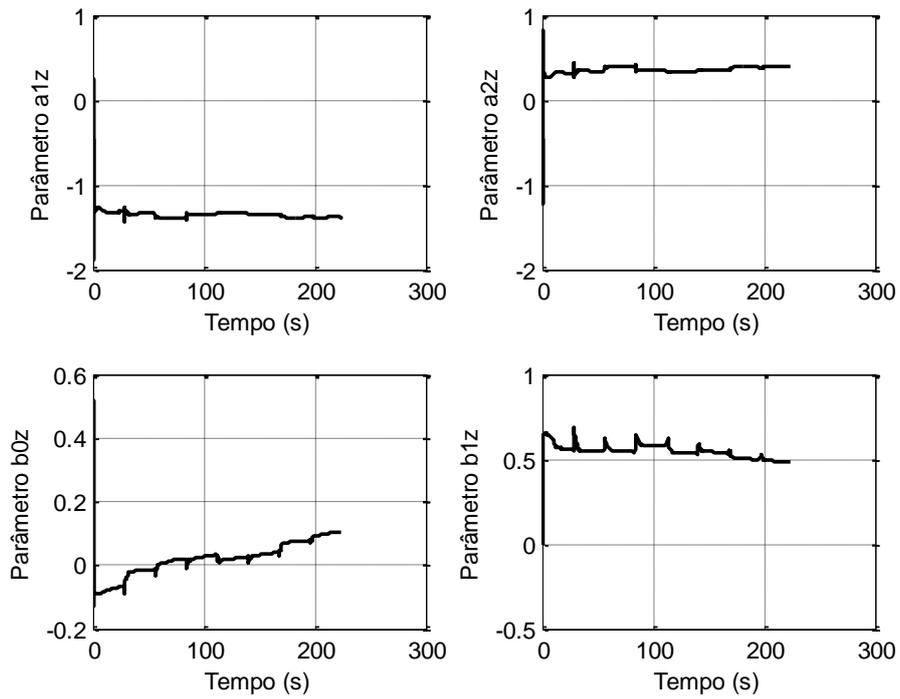


Figura 4.27 – Parâmetros estimados do elo Z do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

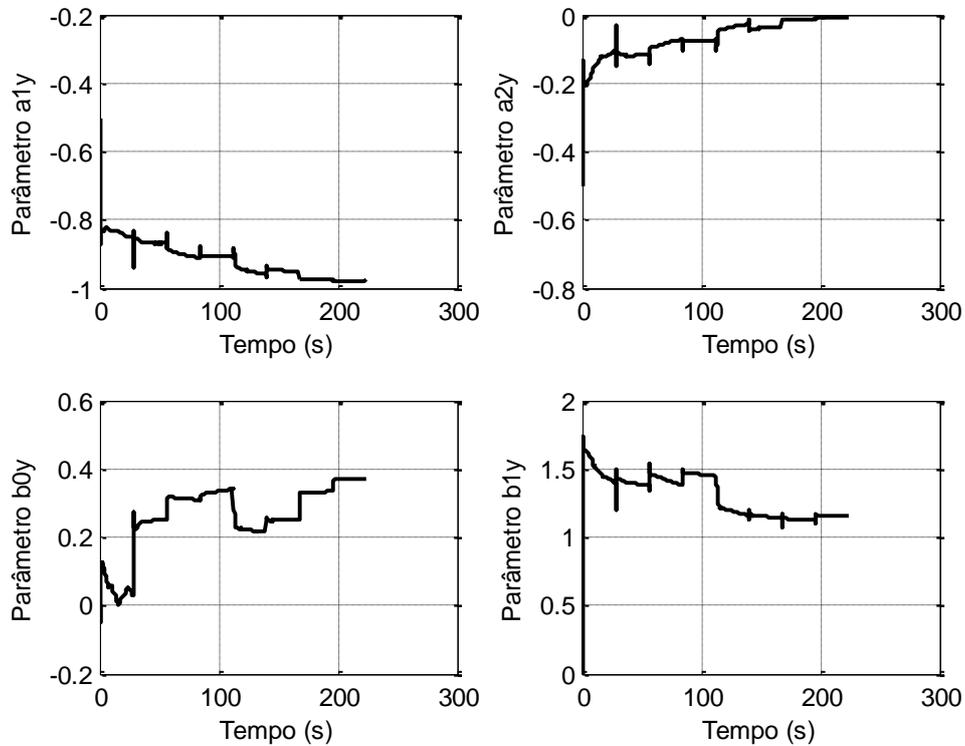


Figura 4.28 – Parâmetros estimados do elo Y do robô utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;

$$Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}; Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}; Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$$

## 4.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram projetados controladores DMV com o critério de Favier e Hassani para os elos do robô, sendo as respostas dos elos do robô analisadas quanto à variação dos parâmetros de Dahlin  $p_\rho$  e dos polinômios de projeto  $Q_\rho(z^{-1})$ , verificando-se que:

- Para valores tendendo a zero dos parâmetros de Dahlin  $p_\rho$  as respostas dos elos do robô apresentaram sobre-sinais elevados, baixos tempos de acomodações e mais oscilações, em relação às respostas utilizando estes parâmetros com valores próximos da unidade.
- Aumentando os parâmetros  $q_{0\rho}$  dos polinômios de projeto  $Q_\rho(z^{-1})$  os elos do robô se comportaram de forma mais estável, porém, apresentando maiores erros em regime permanente.
- Utilizando os parâmetros  $q_{1\rho}$  nos polinômios de projeto  $Q_\rho(z^{-1})$  ocorreu uma pequena diminuição dos erros em regime permanente nas respostas dos elos, em relação ao não uso desses parâmetros, e que na utilização de um valor em módulo próximo ao valor de  $q_{0\rho}$  para estes parâmetros, o sistema se tornou instável.

Também foi verificado neste capítulo que utilizando  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$  obtém-se as respostas desejadas dos elos do robô, segundo especificações de: máximo sobre sinal de 15% e de erro em regime permanente de  $\pm 5\%$

## CAPÍTULO V

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a modelagem matemática e o projeto de controladores adaptativos para o posicionamento dos três elos de um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade.

No processo de identificação do sistema foram utilizados programas computacionais desenvolvidos na plataforma LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup> usando o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR). Neste processo utilizou o modelo ARX para representar os elos do robô, e então se realizou um estudo, tomando como base os índices de desempenho  $SEQ$ ,  $R^2$  e  $AIC$ , para determinar as estruturas dos modelos que melhor representassem os elos do robô. Neste processo chegou-se a um modelo comum aos três elos, tendo na estrutura dois pólos, um zero e um atraso de transporte, escolhido por apresentar bons índices de desempenho e maior simplicidade em relação aos demais.

Nos projetos dos controladores adaptativos, foi utilizada a técnica de controle DMV com o critério de Favier e Hassani. Os modelos dos elos do robô determinados no capítulo III foram utilizados nos projetos dos controladores. Os controladores foram implementados utilizando um programa computacional desenvolvido nas plataformas LabVIEW<sup>®</sup> e Matlab<sup>®</sup>, sendo realizado vários testes variando os parâmetros de Dahlin  $p_\rho$  e os polinômios de projeto  $Q_\rho(z^{-1})$ , verificando a influência destes no tempo de estabelecimento, no sobre-sinal, no erro em regime permanente e na estabilidade do sistema, concluindo-se que a resposta do sistema depende diretamente desses parâmetros e que dependendo dos valores escolhidos para eles o sistema pode entrar em instabilidade.

Finalmente verificou-se que, para  $p_x = p_z = 0,8$ ;  $p_y = 0,5$ ;  $Q_x(z^{-1}) = 1,7 - 0,7z^{-1}$ ;  $Q_z(z^{-1}) = 2,1 - 0,8z^{-1}$ ;  $Q_y(z^{-1}) = 1,5 - 0,1z^{-1}$  as respostas dos elos do robô se comportaram dentro das especificações de: máximo sobre sinal de 15% e erro em regime permanente de  $\pm 5\%$ .

## 5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

- Utilização de um modelo diferente para representar os elos do robô manipulador, como por exemplo, o modelo ARMAX.
- Utilização de outros tipos de controladores no robô manipulador estudado, a fim de se obter um comparativo dos resultados.
- Utilização de trajetórias de referência diferentes, para a análise do desempenho dos controladores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, L. A. (Ed), 2007a, *Enciclopédia de Automática*, 1a ed. Vols. 1, 2 e 3. São Paulo: Ed. Blucher.
- AGUIRRE, L. A., 2007b, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 2a ed. Belo Horizonte, MG: Ed. UFMG.
- AL-CHALABI, L.A.; KHALIL, F.F., 1994 “*Dahlin Minimum Variance Self-Tuning Controller*”, *International Journal of Control*, 60(5).
- ALMEIDA, O.M, RODRIGUES, A.C., SCHEFFER, C.B., VARGAS, J.T., COELHO, A.A.R., 1999, “*Avaliação Experimental da Hibridização de Estratégias de Controle Nebulosa e Preditiva em um Processo Não-Linear de Luminosidade*”, *IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pp. 136-141, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- ASTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B., 1973, “*On Self Tuning Regulators*”, *Automatica*, 9.
- ASTRÖM, K. J. & WITTENMARK, B., 1995, *Adaptive Control*. Ed. Addison Wesley Publishing, Segunda Edição.
- BEALE, R. & JACKSON, T., 1991, *Neural Computing: An Introduction*, Editora Adam Hilger, New York.
- CÂMARA, H. T.; CARATI, E.G.; HEY, H.L.; PINHEIRO, H.; PINHEIRO, J.R.; GRUNDLING, H.A., 2002, “Um Servo de Posição com Motor de Indução Usando

Controle Adaptativo Robusto por Modelo de Referência.” In: *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal RN.

CARVALHO, J.S.F; 2009, *Controle Adaptativo aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar*, Tese D.Sc., João Pessoa-PB.

CLARKE, D.W , GAWTHROP, P.G.; 1975. *Self-Tuning Controller*, *Proc. IEE* 122(9)

COELHO, A. A. R., COELHO, L. S., 2004, *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, Editora da UFSC, Brasil.

HAYKIN, S., 1994, *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*, Macmillan, AC-28, pp. 162-171, New York

ISERMANN, R., 1980, “*Practical Aspects of Process Identification*”, *Automática*, Great Britain: v. 16, pp. 575-587.

ISERMANN, R., LACHMAN, K. H., MATKO, D., 1992, *Adaptive Control Systems*. U.S.A.: Prentice Hall.

LEWIS, F.L., DAWSON, D.M., ABDALLAH, T.C, 2004 , *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*, second edition, Marcel Dekker, New York.

LJUNG, L., 1999, *System Identification. Theory for the User., second edn*, Prentice Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey.

KOIVO A. J., GUO T., 1983, *Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulator*, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-28, pp. 162-171.

MALIK O. P., HOPE G. S., CHENG S. L., 1991, *Some issues on the practical use of recursive least squares identification in self-tuning control*, *Int. J. Control*, vol. 53, n. 5, pp. 1021 – 1033

- MARTINS, N.A., 2001, “Projeto de um controlador adaptativo para robôs manipuladores no espaço de juntas”, *Acta Scientiarum*, v. 23, n. 6, p. 1481-1494, Maringá, São Paulo, Brasil.
- MILLER III, W. T. & SUTTON, R. S. & WERBOS, P. J., 1995, *Neural Networks for Control*, The MIT Press, London.
- MONTENEGRO, P.H.M.; Riul, J. A.; Oliveira, B. S.; Silva, S. A., 2004, “Controle Adaptativo aplicado em um Sistema Eletropneumático”. *In: VI Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional*, Itajubá. MG
- MONTENEGRO, P. H. M., 2007, “Controle de Temperatura de Ar em um Túnel Psicrométrico Por Meio de Técnicas Adaptativas”, Tese D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- QUILES, E., MORANT, F., GARCIA, E., BLASCO., R., CORRECHER, A., 2002, “Control Adaptativo de un Sistema de Control Neumático”, *In: Conferência Iberoamericana em Sistemas, Cibernética e Informática*, Orlando, USA
- ROMANO,V.F; 2002, *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*, Editora: Edgard Blucher Ltda.
- RIUL, J. A.; MONTENEGRO, P. H. M.; SILVA, S. A.; MELO, B.A., 2004, “Position Adaptive Control in a Co-ordinate Table.” *In: XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Recife, PE.
- SOUZA, O.B, 2010, *Controle Adaptativo Aplicado em Dois Elos de um Robô Manipulador Eletropneumático de Três graus de Liberdade Cartesiano*, Dissertação, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- SEBORG, 1994, *A perspective on strategies for process control, Modeling, Identification and Control*, vol. 15, n. 3, pp. 179-189.

SILVA, S. A.; MONTENEGRO, P.H.M.; RIUL, J. A.; LUNA, M.L.G., 2004, “Controle de Torque em sistema com acoplamento eletromagnético, utilizando a Técnica de Gain Scheduling.” *In: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Bélem do Pará, PA.

SPONG MARK W., VIDYASAGAR M., 1989, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, New York.

VAZ,G.L.F.,1999,*Controladores Adaptativos de Variância Mínima e Dahlin:Uma revisão e novas concepções de projeto*. Dissertação M.Sc.,UFSC,Florianópolis, SC,Brasil.

WELLSTEAD, P.E., ZARROP, M.B., 1991, *Self-Tuning Systems: Control and Signal Processing*. John Wiley & Sons Ltd.

ZAFIROU, E., MORARI, M., 1985, “*Digital Controllers for SISO Systems: a Review and a New Algorithm*”, *International Journal of Control*, 42(4).

## APÊNDICE A

### TÉCNICAS DE CONTROLE ADAPTATIVO

#### A.1 CONTROLE AUTO-AJUSTÁVEL BASEADO NA ESTRATÉGIA DE VARIÂNCIA MÍNIMA

Considere um sistema de entrada única e saída única representado pelo modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX) do inglês autoregressive moving average with exogenous inputs dado pela Eq. (A.1) (AGUIRRE, 2007b):

$$\rho(k) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(k) \quad (\text{A.1})$$

onde  $d$  é o atraso de transporte,  $\rho(k)$  e  $u(k)$  são respectivamente a saída e a entrada do sistema no instante  $k$ ,  $e(k)$  é uma variável aleatória de média nula (ruído branco) e variância  $\sigma_e^2$ , que perturba o sistema.  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  e  $C(z^{-1})$  são polinômios em  $z^{-1}$  definidos da seguinte forma:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (\text{A.1.a})$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (\text{A.1.b})$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{nc}z^{-nc} \quad (\text{A.1.c})$$

A lei de controle para a estratégia de variância mínima auto-ajustável é obtida minimizando a função custo dada por (WELLSTEAD e ZARROP, 1991):

$$J = E[\rho^2(k+d)] \quad (\text{A.2})$$

onde  $E[.]$  representa a média do sinal.

Para obter-se a equação do modelo no instante  $k+d$ , multiplica-se ambos os lados da Eq. (A.1) por  $z^d$  e obtém-se:

$$\rho(k+d) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k+d) \quad (\text{A.3})$$

Definindo agora a identidade polinomial, conforme Eq. (A.4) (WELLSTEAD e ZARROP, 1991):

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (\text{A.4})$$

onde:

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{d-1} z^{-(d-1)} \quad (\text{A.4.a})$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + f_{n_g} z^{-n_g} \quad (\text{A.4.b})$$

$$n_g = \text{máximo}(n_a - 1, n_c - d) \quad (\text{A.4.c})$$

de tal forma que  $F(z^{-1})$  represente os primeiros  $d$  termos da expansão  $C(z^{-1})/A(z^{-1})$ .

Utilizando a identidade polinomial definida na Eq. (A.4) na Eq. (A.3) obtém-se:

$$\rho(k+d) = \left[ \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) \right] + F(z^{-1})e(k+d) \quad (\text{A.5})$$

Reescrevendo a Eq. (A.1) em função do ruído branco  $e(k)$  têm-se então:

$$e(k) = \frac{A(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) - \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) \quad (\text{A.6})$$

Substituindo a Eq. (A.6) na Eq. (A.5) chega-se em:

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

Simplificando a equação (A.7), com a utilização da identidade polinomial definida na equação (A.4), tem-se:

$$\rho(k+d) = \left[ \frac{B(z^{-1}) F(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) + \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) \right] + F(z^{-1}) e(k+d) \quad (\text{A.8})$$

A expressão de  $\rho(k+d)$  dada pela Eq. (A.8) é a soma de dois termos independentes, onde pode-se interpretar o primeiro termo como sendo a melhor previsão de  $\rho(k+d)$  baseada em dados até o instante  $k$  e é escrito como:

$$\hat{\rho}(k+d|k) = \left[ \frac{B(z^{-1}) F(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) + \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) \right] \quad (\text{A.9})$$

Sendo assim o segundo termo da Eq. (A.8) é o erro de previsão decorrente do ruído, e é da forma:

$$F(z^{-1}) e(k+d) = \rho(k+d) - \hat{\rho}(k+d|k) \quad (\text{A.10})$$

Substituindo a equação (A.9) e a equação (A.8) na função custo da equação (A.2):

$$J = E[\rho^2(k+d)] = E[\hat{\rho}(k+d|k) + F(z^{-1}) e(k+d)]^2 \quad (\text{A.11})$$

$$= E[\hat{\rho}(k+d|k)]^2 + (1 + f_1^2 + \dots + f_{d-1}^2) \sigma_e^2$$

Então claramente a função custo dada pela Eq. (A.11) é minimizada quando  $\hat{\rho}(k+d|k)=0$ . Consequentemente a lei de controle de variância mínima é dada pela seguinte equação:

$$u(k) = -\frac{G(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})}\rho(k) \quad (\text{A.12})$$

Incluindo um sinal de referência  $w(k)$  para o sinal de saída tem-se a função de transferência em malha fechada dada pela equação abaixo (AL-CHALABI e KHALIL, 1994):

$$\rho(k) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})}\rho(k) \right] + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(k) \quad (\text{A.13})$$

Usando a identidade polinomial da Eq. (A.4) para simplificar a Eq. (A.13), têm-se::

$$\rho(k) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})F(z^{-1})}{C(z^{-1})} w(k) + F(z^{-1})e(k) \quad (\text{A.14})$$

## A.2 CONTROLE DE DAHLIN

O controlador de Dahlin exige que a resposta de um sistema em malha fechada se comporte como a de um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, para um degrau como referência (VAZ, 1999). Para esse critério a saída do sistema pode ser dada pela Eq. (A.15):

$$\rho(k) = pz^{-1}\rho(k) + (1-p)z^{-d}w(k) \quad (\text{A.15})$$

onde:  $d$  é o atraso de transporte,  $p = e^{-\lambda\tau_a}$ ,  $\lambda = 1/\tau$ ,  $\tau_a$  é o tempo de amostragem,  $\lambda$  é o parâmetro de ajuste de Darlin e  $\tau$  é a constante de tempo do sistema. Aumentando

parâmetro  $\lambda$  de Dahlin,  $p$  tende a zero e o sistema fica mais rápido e quando diminuindo-o,  $p$  tende a 1 (um) e o sistema fica mais lento, portanto,  $p$  é ajustado entre 0 e 1 para se obter a velocidade desejada para a saída do sistema, sendo ele na prática tratado como o parâmetro de Dahlin em vez de  $\lambda$ .

Da Eq. (A.15) chega-se a função de transferência em malha fechada  $G_{MF}(z^{-1})$ :

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

ZAFIRIOU e MORARI (1985) fazem uma síntese da função de transferência em malha fechada dada pela Eq. (A.16) para uma estrutura em malha aberta fazendo  $G_{MF}(z^{-1}) = D_0(z^{-1})G_0(z^{-1})$ , conforme Eq. (A.17):

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

onde:  $D_0(z^{-1})$  é a equação de síntese em malha aberta equivalente para o controlador de Dahlin e  $G_0(z^{-1})$  é a função de transferência do sistema a ser controlado.

### **A.3 CONTROLADOR AUTO-AJUSTÁVEL DE DAHLIN-VARIÂNCIA MÍNIMA (DMV)**

O controlador DMV consiste em combinar o controlador de Dahlin com a estratégia de controle de variância mínima (AL-CHALABI E KHALIL, 1994), colocando o controlador de variância mínima em série com o controlador de Dahlin. Usando a Eq. (A.14) e desprezando o efeito do ruído chega-se a função de transferência em malha fechada do controlador de variância mínima:

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

Substituindo a Eq. (A.18) na Eq. (A.17), tem-se:

$$D_0(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \frac{(1-p)}{1-pz^{-1}} \quad (\text{A.19})$$

Fazendo:

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

Substituindo a Eq. (A.20) na Eq. (A.19), tem-se:

$$D_0(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \quad (\text{A.21})$$

O sistema resultante é mostrado na Fig. (A.1).

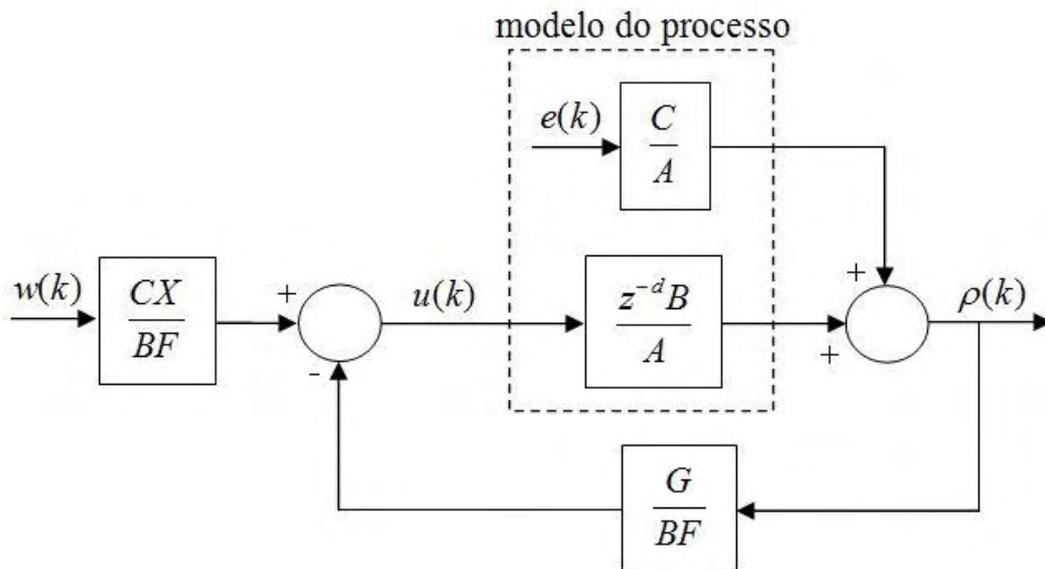


Figura A.1 – Controlador de Dahlin em série com o controlador de variância mínima.

Rearranjando os componentes do sistema mostrado na Fig. (A.1) chega-se a lei de controle do controlador DMV dada pela Eq. (A.22). A Fig. (A.2) mostra o sistema depois do rearranjo.

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} \rho(k) \right] \quad (\text{A.22})$$

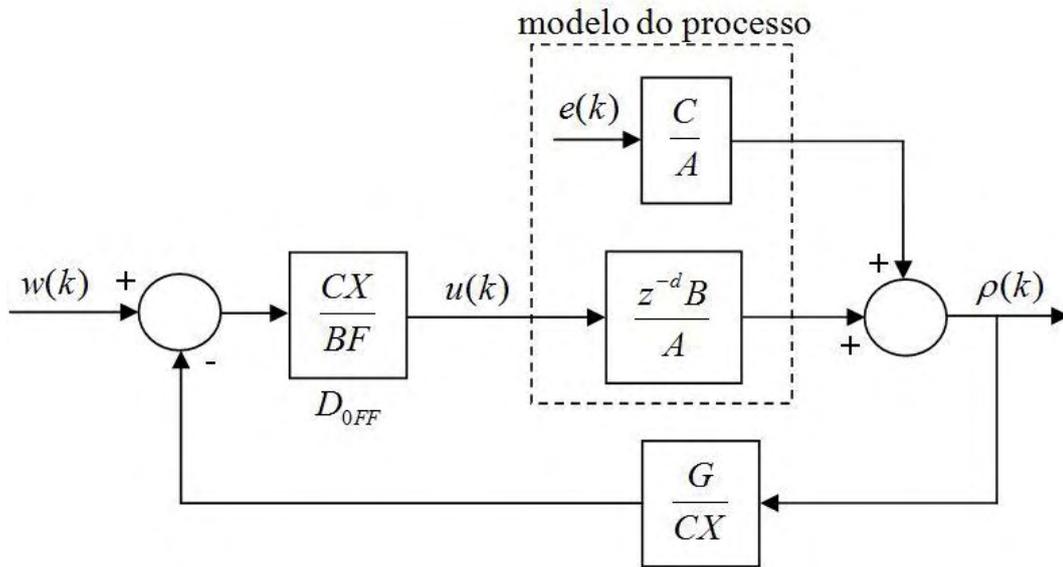


Figura A.2 – Controlador DMV.

Esta lei de controle 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. Então AL-CHALABI e KHALIL (1994) modificaram a estrutura da Fig. (A.2) adicionando  $C(z^{-1})Q(z^{-1})$  no denominador do bloco direto do controlador  $D_{0FF}$ , que agora é dado por:

$$D_{0FF}(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (\text{A.23})$$

Para compensar a alteração dada pela Eq. (A.23) é adicionada uma função de transferência suplementar ao modelo do sistema, dada por:

$$G_s(z^{-1}) = z^{-d} \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})/F(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (\text{A.24})$$

onde:  $Q(z^{-1})$  é um polinômio de projeto em  $z^{-1}$  e  $F(z^{-1})$  é dado pela Eq. (A.4.a).

O sistema com as alterações é mostrado na figura (A.3) e a lei de controle modificada para sistemas de fase não mínima é dada pela equação (A.25)

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})X(z^{-1})}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \left[ w(k) - \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})X(z^{-1})} \rho(k) \right] \quad (\text{A.25})$$

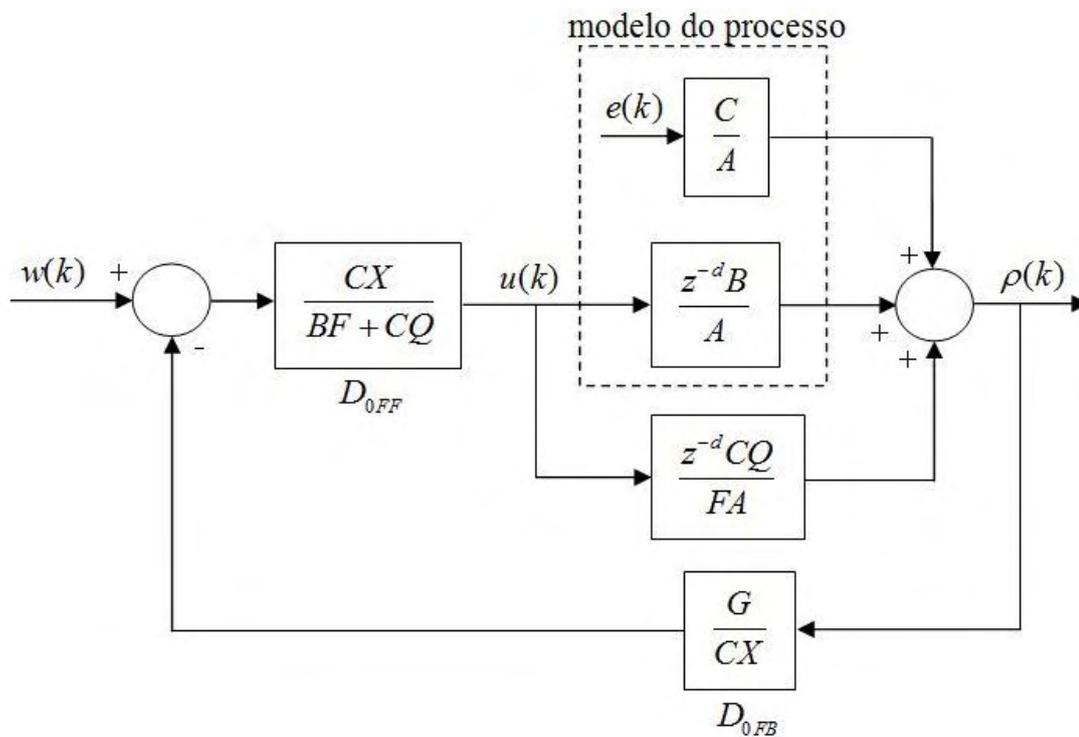


Figura A.3 – Controlador DMV modificado para tratar de sistemas de fase não mínima.

#### A.4 CONTROLADOR DAHLIN-VARIÂNCIA MÍNIMA COM O CRITÉRIO DE FAVIER E HASSANI

O controlador Dahlin-Variância Mínima com o critério de Favier e Hassani é uma combinação do controlador Dahlin-Variância Mínima (DMV) com o critério estabelecido

por Favier e Hassani, que consiste em colocar uma referência para a variável de controle, tratando a saída do sistema como uma saída generalizada (VAZ, 1999).

Considerando o modelo ARMAX com a função de transferência suplementar  $G_s(z^{-1})$  e incluindo uma referência  $u_r(k)$  para o sinal de controle  $u(k)$  conforme Fig. (A.4); a saída generalizada do sistema é dada por:

$$\rho(k) = \frac{1}{A(z^{-1})} z^{-d} \left\{ \left[ B(z^{-1}) + \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} \right] u(k) + \right. \\ \left. - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} u_r(k) \right\} + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) \quad (\text{A.26})$$

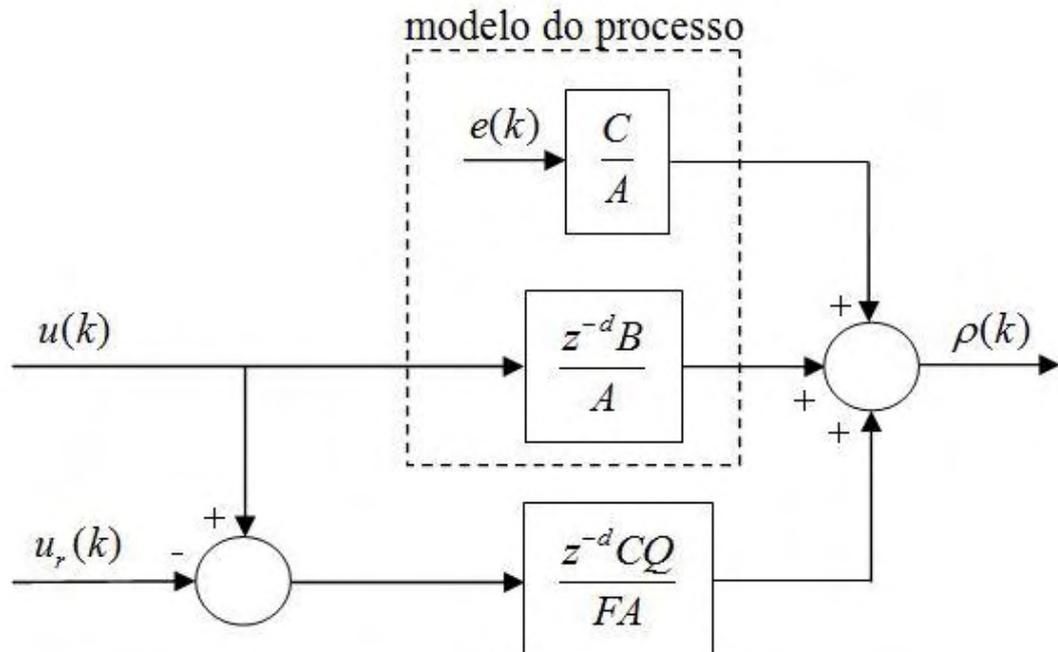


Figura A.4 – Sistema generalizado para o controlador DMV com o critério de Favier e Hassani.

Multiplicando a Eq. (A.26) por  $z^d$  e reorganizando os termos, tem-se:

$$\rho(k+d) = \frac{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u(k) - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u_r(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k+d) \quad (\text{A.27})$$

Utilizando a identidade polinomial definida na Eq. (A.4) na Eq. (A.27) obtém-se:

$$\rho(k+d) = \frac{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u(k) - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u_r(k) + \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) + F(z^{-1})e(k+d) \quad (\text{A.28})$$

Reescrevendo a Eq. (A.26) em função do ruído  $e(k)$  e multiplicando o resultado por  $G(z^{-1})/A(z^{-1})$  têm-se:

$$\frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k) = \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) + -z^{-d} \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})C(z^{-1})} \left\{ \left[ B(z^{-1}) + \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} \right] u(k) - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} u_r(k) \right\} \quad (\text{A.29})$$

Substituindo a Eq. (A.29) na Eq. (A.28) chega-se a seguinte equação:

$$\rho(k+d) = \frac{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u(k) - \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})A(z^{-1})} u_r(k) + \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) - z^{-d} \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})C(z^{-1})} \left\{ \left[ B(z^{-1}) + \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} \right] u(k) + \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})}{F(z^{-1})} u_r(k) \right\} + F(z^{-1})e(k+d) \quad (\text{A.30})$$

Simplificando a Eq. (A.30) utilizando a identidade polinomial definida na Eq. (A.4), tem-se:

$$\begin{aligned} \rho(k+d) = & \frac{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})}{C(z^{-1})} u(k) - Q(z^{-1})u_r(k) + \\ & + \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} \rho(k) + F(z^{-1})e(k+d) \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

Para obter-se o controle, dada uma referência  $w(k)$ , adiciona-se o termo  $-X(z^{-1})w(k)$  em ambos os lados da equação (A.31), conforme Eq. (A.32):

$$\begin{aligned} \rho(k+d) - X(z^{-1})w(k) = & \frac{1}{C(z^{-1})} \left[ \left( B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1}) \right) u(k) + \right. \\ & \left. - C(z^{-1})Q(z^{-1})u_r(k) + G(z^{-1})\rho(k) - C(z^{-1})X(z^{-1})w(k) \right] + F(z^{-1})e(k+d) \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

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

$$J = E \left\{ \left[ \rho(k+d) - X(z^{-1})w(k) \right]^2 \right\} \quad (\text{A.33})$$

Substituindo a equação (A.32) em (A.33) e igualando a zero o primeiro termo do lado direito, tem-se que a lei de controle para o controlador DMV com o critério de Favier e Hassani, conforme Eq.(A.34):

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})Q(z^{-1})u_r(k) - G(z^{-1})\rho(k) + C(z^{-1})X(z^{-1})w(k)}{B(z^{-1})F(z^{-1}) + C(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (\text{A.34})$$

Fazendo  $u_r(k) = 0$  na Eq. (A.34) chega-se a lei de controle do controlador DMV modificado para tratar de sistemas de fase na mínima, dada na Eq. (A.25).

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 a 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. (A.34) em condições de regime permanente, resultando na seguinte expressão para referência da variável de controle:

$$u_r(k) = \frac{C(1) - G(1)}{B(1)F(1)} w(k) \quad (\text{A.35})$$