



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mestrado

**PROJETO DE UM CONTROLADOR PD
ADAPTATIVO VIA ALOCAÇÃO DE POLOS
APLICADO EM UM ROBÔ MANIPULADOR DE
DOIS GRAUS DE LIBERDADE PLANAR**

por

Laís Pereira Régis

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do Grau de Mestre

João Pessoa – Paraíba

Dezembro de 2013

LAÍS PEREIRA RÉGIS

**PROJETO DE UM CONTROLADOR PD ADAPTATIVO
VIA ALOCAÇÃO DE POLOS APLICADO EM UM ROBÔ
MANIPULADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE
PLANAR**

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: Prof. Dr. Paulo Henrique de Miranda Montenegro

João Pessoa – Paraíba

Dezembro de 2013

R337p Régis, Laís Pereira.

Projeto de um controlador PD adaptativo via alocação de polos aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar / Laís Pereira Régis.-- João Pessoa, 2013. 95f. : il.

Orientador: Paulo Henrique de Miranda Montenegro
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia mecânica. 2. Robô manipulador.
3. Identificação de sistemas. 4. Controlador PD.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**PROJETO DE UM CONTROLADOR PD ADAPTATIVO VIA
ALOCÇÃO DE POLOS APLICADO EM UM ROBÔ
MANIPULADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE**

por

Lais Pereira Régis

Dissertação aprovada em 13 de dezembro de 2013



Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DE MIRANDA MONTENEGRO
Orientador – UFPB



Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO RIUL
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz Régis Neto e Maricélia Pereira Régis.

Ao meu companheiro tão amado Moisés Menezes Salvino.

Ao meu irmão Luiz Henrique Pereira Régis.

Aos meus amigos Mirleide Dantas, Iluska Maribondo, Paulo Henrique Vasconcelos, Marcílio Moraes e Pedro Luiz Christiano.

Aos meus sogros Antônio Pereira Salvino e Maria de Fátima Menezes Salvino.

Aos demais familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por guiar meus passos até aqui.

Aos meus familiares, amigos, colegas de mestrado e professores, e a todos que participaram direta ou indiretamente da minha jornada.

Ao professor Paulo Henrique de Miranda Montenegro pela dedicação e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPB, em especial ao Prof. José Antônio Riul pelos comentários e sugestões durante o decorrer do curso.

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica e Controle Erick, Anrafel, Magnum, Ademar e Oldinéia pelo bom ambiente de trabalho.

À Moisés Salvino pelo companheirismo e inestimável apoio.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

PROJETO DE UM CONTROLADOR PD ADAPTATIVO VIA ALOCAÇÃO DE POLOS APLICADO EM UM ROBÔ MANIPULADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE PLANAR

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de técnicas de controle adaptativo para um robô manipulador de dois graus de liberdade planar formado por um elo rotacional e outro prismático. O elo rotacional é composto por um ramo extenso em formato de U em alumínio acionado por um moto-redutor de corrente contínua, cujo sensoriamento da sua posição angular é realizado por um potenciômetro de dez voltas. O elo prismático é um cilindro pneumático de dupla ação com haste simples fixada na parte interna do ramo em U sendo acionado por uma válvula eletropneumática proporcional, onde sua posição linear é dada através de uma régua potenciométrica. Através do estimador dos mínimos quadrados recursivos (MQR) é obtido o modelo matemático representativo para cada elo do robô de forma desacoplada e em seguida é projetado e implementado um controlador adaptativo proporcional derivativo (PD) via alocação de polos para obter o controle de posição dos elos do robô manipulador. Os resultados experimentais são apresentados, assim como a avaliação da resposta do sistema sob a ação dos controladores implementados.

Palavras-chave: Robô Manipulador, Identificação de Sistemas, Controlador PD.

DESIGN OF AN ADAPTIVE CONTROLLER PD BY POLE PLACEMENT APPLIED TO A TWO-DEGREE-OF-FREEDOM PLANAR MANIPULATOR ROBOT

ABSTRACT

This work presents a development and implementation of control adaptive techniques for a planar manipulator robot with two degrees of freedom, formed a rotational and a prismatic link. The rotational link is made up of a branch long U-shaped aluminum activated by a motor-reducer DC, its angular position is sensed by a ten turn potentiometer. The prismatic link is a double-acting pneumatic cylinder with a single rod fixed inside the branch U-shaped being triggered by an electropneumatic proportional valve, where linear position is given by a potentiometric ruler. Using the recursive least squares (RLS) estimator is obtained the mathematic model that represents each robot link so as uncoupled, then is designed and implemented an adaptive controller Proportional Derivative (PD-control) by pole placement to obtain the positions of the robot manipulator links. The experimental results are presented, as well as evaluation of the system response under the action of controllers implemented.

Keywords: Manipulator Robot, Systems Identification, PD-control.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1.1 ROBÔS MANIPULADORES	1
1.2 DEFINIÇÃO DO TRABALHO	2
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.4 OBJETIVOS	9
1.4.1 Objetivo Geral	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	10
CAPÍTULO 2	11
2.1 INTRODUÇÃO	11
2.2 DESCRIÇÃO DO ROBÔ MANIPULADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE PLANAR	11
2.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SERVOPOSICIONADOR DO ELO DE ROTAÇÃO	15
2.4 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SERVOPOSICIONADOR DO ELO DE TRANSLAÇÃO	17
2.5 CONCLUSÃO	20
CAPÍTULO 3	21
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	21
3.3 TESTES DINÂMICOS E COLETAS DE DADOS	22
3.3.1 Tempo de Amostragem	22
3.3.2 Escolha do sinal de excitação	25
3.4 ESCOLHA DA REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA A SER UTILIZADA	27
3.5 DETERMINAÇÃO DA ESTRUTURA DO MODELO	28
3.6 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS	31
3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO	36

3.8	CONCLUSÃO	36
CAPÍTULO 4		37
4.1	INTRODUÇÃO	37
4.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CONTROLADORES ADAPTATIVOS ...	37
4.2.1	Contexto Histórico.....	37
4.2.2	Tipos de controladores adaptativos	38
4.3	Considerações sobre o controlador PID.....	39
4.3.1	Modo Proporcional	41
4.3.2	Modo Integral	41
4.3.3	Modo Derivativo	42
4.4	Projeto do Controlador PD auto ajustável via Alocação de Polos para o Robô Manipulador de 2GDL Planar	42
4.5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PELA IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PD NOS ELOS DO ROBÔ MANIPULADOR	48
4.5.1	ELO DE ROTAÇÃO.....	49
4.5.2	ELO DE TRANSLAÇÃO	52
4.6	CONCLUSÕES	56
CAPÍTULO 5		57
5.1	CONCLUSÕES	57
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		59
APÊNDICE A		64
A.1	INTRODUÇÃO	64
A.2	PROJETO VIA ALOCAÇÃO DE POLOS DE UM CONTROLADOR PD DISCRETO	64
APÊNDICE B		70
B.1	INTRODUÇÃO	70
B.2	INTERFACE PRINCIPAL DO PROGRAMA	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Robô Manipulador de 2GDL planar	12
Figura 2.2 - Bancada de Testes	13
Figura 2.3 - Esquema ilustrativo da bancada de testes.....	14
Figura 2.4 - Componentes do elo rotacional	15
Figura 2.5 - Componentes elo de translação	17
Figura 3.1 - Resposta ao degrau do elo de rotação em malha aberta	24
Figura 3.2 - Resposta ao degrau do elo de translação em malha aberta.....	24
Figura 3.3 - Sinal de excitação aplicado ao elo de rotação	26
Figura 3.4 - Sinal de excitação aplicado ao elo de translação.....	26
Figura 3.5 - Diagrama de blocos de um processo de identificação de ajuste do modelo.	31
Figura 3.6 - Resposta real e estimada do elo rotacional em malha aberta.....	34
Figura 3.7 - Resposta real e estimada do elo de translação em malha aberta.....	34
Figura 3.8 - Parâmetros estimados do elo rotacional	35
Figura 3.9 - Parâmetros estimados do elo de translação	35
Figura 4.1- Esquema de um controlador PID.....	40
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do esquema de controle do elo rotacional.....	46
Figura 4.3 - Diagrama de blocos do esquema de controle do elo de translação.....	47
Figura 4.4 - Referência e Posição atual do Elo Rotacional em malha fechada	49
Figura 4.5 - Variável de controle do Elo Rotacional.....	50
Figura 4.6 - Variável Erro de Saída do Elo de Rotação	50
Figura 4.7 - Parâmetros Estimados do Elo Rotacional.....	51
Figura 4.8 - Referência e Posição atual do Elo de Translação em malha fechada	53
Figura 4.9 - Variável de Controle do Elo de Translação.....	53
Figura 4.10 - Variável Erro de Saída do Elo de Translação.....	54
Figura 4.11 - Parâmetros estimados do elo de translação	54
Figura B.1 - Tela principal do programa <i>IdeconPD</i>	71
Figura B.2 - Tela principal do programa <i>IdeconPD</i> referente ao Elo de Rotação (Parte 1).....	72
Figura B.3-Tela principal do programa <i>IdeconPD</i> referente ao Elo de Translação (Parte 2)	72

Figura B.4 - Janela principal da programação.....	73
Figura B.5 - Janela principal da programação (Parte 1).....	74
Figura B.6 - Janela principal da programação (Parte 2).....	74
Figura B.7 - Janela principal da programação (Parte 3).....	75
Figura B.8 - Janela principal da programação (Parte 4).....	75
Figura B.9 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo do MQR.....	76
Figura B.10 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo de f_i	76
Figura B.11 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo de k	77
Figura B.12 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo de erro.....	77
Figura B.13 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo da variável de controle u	78
Figura B.14 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo do parâmetro p do controlador PD	78
Figura B.15 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo do parâmetro q_0	79
Figura B.16 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo do <i>setpoint</i> do elo rotacional	79
Figura B.17 - <i>Sub-vi</i> para o cálculo do <i>setpoint</i> do elo de translação	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações da placa de aquisição de dados	14
Tabela 2.2 - Tensão de excitação versus tensão de saída do amplificador.....	16
Tabela 2.3 - Especificações técnicas do transdutor de posição angular	16
Tabela 2.4 - Dados técnicos da válvula eletropneumática proporcional	18
Tabela 2.5 - Dados técnicos do cilindro pneumático	18
Tabela 2.6 - Especificações técnicas da unidade de suprimento de ar comprimido.....	19
Tabela 4.1 - Especificações de desempenho dos elos de rotação e de translação	44
Tabela 4.2 - Desempenho do elo Rotacional sob a ação do Controlador PD.....	51
Tabela 4.3 - Desempenho do elo de Translação sob ação do Controlador PD.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{∞}	H infinito
p_p	Parâmetros de Dahlin
V	Volts
$V_{\text{tensão}}$	Valor numérico da tensão correspondente ao elo rotacional
d_{mm}	Deslocamento do elo de translação (mm)
θ	Deslocamento do elo de rotação (graus)
V_{ip}	Valor numérico da tensão correspondente ao elo de translação
T_a	Tempo de amostragem
k	Instante de tempo
$e(k)$	Ruído Branco, Variável de erro no tempo discreto
$\Phi^T(k-1)$	Vetor de medidas
$y(k)$	Resposta do sistema
$\hat{\theta}$	Vetor de parâmetros
n_a	Número de polos
n_b	Número de zeros
d	Atraso de transporte
$u(k)$	Sinal de entrada, Variável de controle
a_j e b_j	Parâmetros do modelo
p_n	Número de parâmetros
$t_{95\%}$	Tempo necessário para que a resposta do sistema atinja 95% do seu valor final
N	Número de amostras
$\hat{y}$	Resposta estimada
R^2	Coeficiente de Correlação Múltipla
$\bar{y}$	Média das amostras
λ	Fator de esquecimento

ζ	Fator de amortecimento
ω_n	Frequência angular natural
ss	Sobre-sinal
t_s	Tempo de estabelecimento
z	Símbolo operacional da Transformada Z
p, q_0 e q_1	Parâmetros do controlador
$G_c(z^{-1})$	Estrutura paramétrica de um controlador linear geral no plano discreto
$G_r(z)$	Estrutura do controlador PD
$G_p(z)$	Função de transferência discreta de segunda ordem
$M(z)$	Função de transferência em malha fechada
P_c	Polinômio característico do controlador-planta
z_1 e z_2	Polos discretos do sistema em malha fechada
P_d	Polinômio representativo da parcela do polinômio característico em malha fechada
$A(z), B(z), P(z)$ e $Q(z)$	Polinômios discretos do sistema
$P_o(k)$	Polinômio observador
K_p	Ganho proporcional
K_{p1}	Ganho proporcional referente ao elo de rotação
K_{p2}	Ganho proporcional referente ao elo de translação
$u(t)$	Variável de controle no tempo contínuo
$e(t)$	Variável erro de trajetória
T_I	Tempo integral
T_D	Tempo derivativo
$F_r(z)$	Função de transferência do elo rotacional
$F_p(z)$	Função de transferência do elo prismático

LISTA DE ABREVIações

AIC	Crítério de Informação de Akaike
ARX	Modelo Auto-regressivo com entradas externas
CC	Corrente Contínua
DC	Corrente Direta
DMV	Controle do tipo Dahlin Variância Mínima
GDL	Grau de liberdade
GMV	Variância Mínima Generalizada
GPC	Controle Preditivo Generalizado
GS	Ganho Escalonado
LQG	Linear Quadrático Gaussiano
MQ	Mínimos Quadrados
MQR	Mínimos Quadrados Recursivos
MRAC	Controle Adaptativo por Modelo de Referência
MV	Variância Mínima
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PP	Alocação de pólos
SEQ	Somatório do Erro Quadrático
SI	Sistema Internacional
STR	Regulador Auto-Sintonizado

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ROBÔS MANIPULADORES

O primeiro robô manipulador industrial foi desenvolvido no ano de 1959, por George Devol e Joe Engleberg. O Unimate, como ficou conhecido, era um braço robótico que pesava aproximadamente duas toneladas e seu grau de precisão era de 1 para cada 10000 polegadas. (IFR, 2012)¹.

Atualmente os robôs manipuladores são mais sofisticados, com seus sistemas mecânicos formados por braços que estão normalmente associados ao posicionamento (x, y, z) no espaço físico cartesiano ou operacional, com um punho o qual é responsável pela orientação (θ , Φ , Ψ) da garra, pinça ou outro dispositivo para a realização da tarefa desejada (CRAIG, 2004). Estes componentes são constituídos por partes rígidas, os elos, articulados entre si e proporcionam o movimento do manipulador em vários graus de liberdade, onde a conexão entre esses elos se dá através das juntas (ROMANO, 2002). O manipulador visto como uma planta a ser controlada com parâmetros que variam ao longo do tempo recebe um sinal do controlador que é enviado para cada elo correspondente fazendo com que este se mova para a posição desejada e por sua vez um sensor de posição manda um sinal de resposta em tempo real relacionado a localização atual do elo do robô. (TURNER *et al.*, 1985).

¹ International Federation of Robotics, 2012.

A indústria vem sendo um dos grandes alvos do mercado de robôs manipuladores, já que estes conseguem reproduzir os movimentos humanos de forma mais rápida, precisa e com um custo menor, podendo ser utilizados na montagem, fabricação e pintura da maioria dos produtos presentes no nosso dia a dia, como a placa mãe de um computador, *hardwares* periféricos e os automóveis. Hoje, com todas as pesquisas e tecnologias presentes na área de automação e controle, os engenheiros conseguem um grande êxito na reprodução das diferentes formas de movimentos possíveis para que os braços robóticos desempenhem trabalhos considerados pesados, cansativos, perigosos e prejudiciais aos seres humanos. (KAWAMURA *et al*, 2007)

1.2 DEFINIÇÃO DO TRABALHO

Os benefícios de utilizar robôs manipuladores são numerosos e vão desde o aumento da produtividade, redução de horários e a segurança no trabalho (KLAFTER, *et al*, 1989). Porém, na prática, a aplicação desses robôs requer uma solução confiável e robusta que desempenhe de forma eficiente as funções determinadas (SCHEINMAN, V. 1998).

Com isso, o estudo dos manipuladores robóticos vem sendo desenvolvido a fim de aplicar diferentes técnicas de controle visando o seu uso no campo industrial. Para o projeto de controladores se faz necessário obter um modelo matemático representativo do sistema real, para isso a área de identificação de sistemas se dedica em estudar técnicas alternativas de modelagem matemática e estas ocorrem de acordo com o conhecimento prévio do sistema a ser modelado (AGUIRRE, 2007). O método de controle mais tradicional e popular presente nos sistemas robóticos industriais é o controlador Proporcional Integrativo Derivativo (PID), este controlador possui uma simples implementação e também é conhecido por dispor de um desempenho satisfatório em diversos tipos de aplicação (SMITH *et al*, 1995). O presente trabalho propõe projetar e implementar uma variação do controlador PID convencional, o controlador Proporcional Derivativo (PD) auto ajustável via alocação de polos, nos elos do robô manipulador em estudo.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde que a empresa Unimation instalou o primeiro robô industrial em 1959, na atualidade mais de 700.000 mil robôs são aplicados nas indústrias em todo o mundo (ENGELBERG, J. F., 1995). Por isso, nas últimas décadas a pesquisa voltada para o desenvolvimento de controladores adaptativos tem sido intensificada com o objetivo de aplicar os projetos de controle em processos industriais (NOF, S. Y., 1985).

Importantes trabalhos voltados para o controle desses sistemas robóticos estão sendo desenvolvidos, ao longo desses anos, no intuito de projetar e implementar técnicas cada vez mais sofisticadas e eficientes para o controle de trajetória, força e posição dos manipuladores, onde a primeira aplicação desses controladores se deu em 1979 quando DUBOWSKY e DESFORGES implementaram uma técnica de parametrização otimizada em um robô de seis graus de liberdade.

Kurz *et al* (1980), realizaram um complexo estudo comparativo sobre a aplicação experimental de diversos tipos de algoritmos de controle adaptativo de parâmetros. Esses controladores foram obtidos através da estimação recursiva de dois parâmetros e seis algoritmos de controle determinísticos e estocásticos.

Tao (1992), desenvolveu um esquema de controle adaptativo robusto para um robô manipulador com os parâmetros variantes no tempo e com uma dinâmica não modelada. Foi assegurado que todos os sinais da malha fechada do sistema robótico foram delimitados devido ao uso do controlador e o erro de rastreamento foi da ordem da variação dos parâmetros.

Yao *et al* (1994), desenvolveram um método adaptativo para o controle do movimento e rastreamento do erro de um robô manipulador na presença de incertezas nos parâmetros da dinâmica do sistema, superfície de contato e perturbações externas. O método de controle VSA foi projetado e sua eficácia foi obtida a partir da união entre os métodos de controle VSC e controle adaptativo. O desempenho do método proposto foi ilustrado nos resultados.

Smith *et al* (1995), compararam o uso de dois projetos de controle implementados no eixo de uma máquina-ferramenta de precisão. Os controladores

utilizados foram o Proporcional Integrativo Derivativo (PID) e um controlador com compensação de fase. Os resultados mostraram que o desempenho global das respostas transitória e de estado estacionário foram mais satisfatórias com o uso do controlador adaptativo, onde o controlador de fase se mostrou mais robusto quando foram alterados alguns parâmetros do sistema e a trajetória.

Fujiwara *et al* (1995), propuseram em seu artigo um método de auto ajuste do controlador I-PD para um cilindro pneumático via redes neurais. No projeto o ganho do controlador I-PD foi ajustado automaticamente a partir de um sistema neural, visando uma maior eficiência no controle de sistemas que apresentaram tempo morto. As simulações e resultados apresentados mostraram que o método proposto foi satisfatório para o controle de posição do cilindro pneumático.

Em 1996, Siciliano e Villani projetaram um controlador adaptativo compatível para robôs manipuladores, onde a lei de controle foi desenvolvida no espaço de tarefas com base num modelo não linear e uma ação do compensador linear. O modelo foi obtido a partir de uma combinação entre o erro de posição, o erro da velocidade e da integral do erro da força. Utilizando o método clássico de Lyapunov, foi demonstrado que a lei de controle proposta garante o rastreamento dos componentes sem restrições quanto à trajetória do efetuador desejado ao longo da direção restrita. Os testes foram realizados num robô manipulador industrial em contato com uma superfície elástica.

Chao e Teng (1997), projetaram um PD como controlador *Fuzzy* (STFC) sem o erro de estado estacionário, com base nos ajustes dos fatores de escala. Foi proposto um ajuste em duas fases, uma direta e outra indireta, os quais os resultados apresentados foram para as simulações feitas com sistemas lineares invariantes no tempo e sistemas instáveis não lineares, onde a técnica proposta gera rapidamente uma situação estável de erro zero sem um *overshoot* ou um comportamento oscilatório do sistema.

Liu (1997), propôs em seu artigo uma abordagem descentralizada do controle robusto não linear para o rastreamento de um robô manipulador. A lei de controle foi baseada em uma descentralização não linear da estrutura de controle, obtida através da redefinição da dinâmica do erro de rastreamento usado por (SLOTINE e LI, 1987). Com base nos resultados obtidos das condições de estabilidade e de convergência de rastreamento do erro com o controlador PD, foi utilizada uma lei de controle robusto para melhorar o desempenho do controlador PD de convergência local à global.

Battistella *et al* (1999), apresentaram em seu artigo um comparativo entre as performances de um controlador clássico de juntas PD e do controle a partir de Redes Neurais Artificiais para realizar o controle de posição num espaço livre de um manipulador SCARA. Neste caso, o controlador PD foi desenvolvido em conjunto com uma rede neural sendo empregada para compensar as não linearidades e perturbações sobre o sistema, com o treinamento do controlador sendo realizado de forma *online*. Os resultados das simulações mostraram que as estruturas de controle neural apresentaram ações de controle mais oscilatórias em comparação com as estratégias convencionais de controle de posição e controle híbrido força/posição, além disso, existiu a necessidade de se ter um controle principal (controlador PD).

Santibañez e Kelly (2001), propuseram em seu artigo uma nova análise do controlador PD compensado por antecipação para robôs manipuladores. Foi proposta uma rigorosa função de Lyapunov que permitiu obter as condições no ganho do controlador para garantir a estabilidade assintótica global. A eficácia do controlador PD compensado por antecipação foi observada através dos resultados experimentais obtidos de um robô manipulador de 2 GDL de acionamento direto, assim foi constatado que esse controlador possui um desempenho tão bom quanto o modelo base do clássico controle de torque.

Martins, N. A. (2001), realizou em seu artigo um estudo comparativo entre técnicas de controle adaptativo direto para robôs manipuladores no espaço de tarefa. Foram analisadas as estratégias de controle adaptativo de *Craig*, de *Slotine* e *Li* e a técnica proposta pelo autor do artigo, a partir de uma simulação com trajetórias iguais cujo desempenho foi avaliado baseando-se no comportamento dos erros de seguimento (de posição e de velocidade), na precisão do seguimento de trajetória e na estimação de parâmetros desconhecidos. Os resultados das simulações mostraram que as estratégias de controle adaptativo abordadas apresentaram desempenho satisfatório no seguimento das trajetórias desejadas enquanto que, no caso não adaptativo, foram obtidos erros de seguimento significativos e as trajetórias desejadas não foram seguidas pelo robô manipulador.

Alonge *et al* (2003), descreveram em seu artigo uma nova lei de controle adaptativo aplicado num manipulador robótico, onde foram utilizados os valores de referência da velocidade ao invés dos valores reais no cálculo da matriz de regressores,

e os sinais de retorno gerados a partir dos erros de posição. Esta lei é adequada para o rastreamento de trajetórias e tarefas de posicionamento. Os resultados experimentais realizados mostraram uma boa precisão no rastreamento da posição do manipulador utilizado.

Uzmay *et al* (2004), apresentam um estudo sobre a aplicação de métodos de controles adaptativo e robusto em um sistema de manipulação cooperativa, que foi desenvolvido para o tratamento de um objeto por dois elos de um robô manipulador planar. Novas entradas são definidas para o controlador através das incertezas paramétricas e a teoria da estabilidade garantida baseada em Lyapunov para sistemas incertos.

Montenegro (2007), realizou projetos de controladores adaptativos para um túnel psicrométrico. O modelo matemático representativo do sistema foi obtido pelo método dos Mínimos Quadrados Recursivos, com seus parâmetros sendo estimados em tempo real. Foram implementados no sistema o controlador proporcional integral (PI) com ganho tabelado, o controlador PI auto ajustável via alocação de polos, um controlador de variância mínima (MV) auto ajustável e um controlador preditivo generalizado (GPC) auto ajustável. Esses controladores avaliaram o erro, que é dado pela diferença entre a temperatura ajustada e a temperatura do sistema, e posteriormente determinam o nível de tensão necessário para o sistema. Foram apresentados os resultados experimentais e das simulações dos modelos estimados e das respostas do sistema sob a ação dos controladores projetados e implementados.

Luna (2008), desenvolveu projetos de controladores para os elos de um robô manipulador de dois graus de liberdade planar utilizando técnicas de controle robusto. As funções de transferência para cada elo foram determinadas de forma desacoplada a partir da identificação paramétrica do sistema. Em seguida, os controladores foram complementados com a técnica de controle robusto H_∞ para cada elo de forma simultânea, onde os resultados experimentais obtidos mostraram que, para cinco diferentes trajetórias do tipo rampa existe uma robustez com relação ao acompanhamento da trajetória.

Carvalho (2009), desenvolveu um projeto de controle adaptativo o qual foi implementado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar. O robô possui um elo rotacional e outro prismático, onde o modelo matemático representativo

desse sistema foi obtido através da estimação dos parâmetros, em tempo real, pelo método dos Mínimos Quadrados Recursivos. Visando o controle de posição do manipulador, foram projetados e implementados controladores adaptativos de Variância Mínima Generalizada (GMV) auto ajustáveis. O autor desse estudo apresentou as comparações entre os resultados experimentais e das simulações dos modelos estimados e respostas do sistema, sob a ação dos controladores, com seus elos operando de forma acoplada e desacoplada.

Cordeiro (2009), apresentou uma simulação de um sistema hidráulico de dois graus de liberdade para o posicionamento de uma carga num plano horizontal. O modelo matemático linear que representa esse sistema foi determinado pelas leis físicas, com a identificação realizada de forma *online* pelo método dos Mínimos Quadrados Recursivos a fim de obter os parâmetros estimados do modelo. Em seguida, foi projetado e elaborado um controlador adaptativo auto ajustável composto pela lei de controle de Mínima Variância Generalizada (GMV), definido por ISERMANN *et al* (1992). Os resultados da atuação do controlador sobre a mesa de coordenadas para seguir as trajetórias especificadas foram apresentados através das curvas experimentais do desempenho do sistema, da variável de controle, dos parâmetros estimados do sistema e do erro de estimação.

Riul *et al* (2010), descreveram em seu artigo o uso de um controlador adaptativo GMV aplicado aos elos de um robô manipulador de 3GDL cartesiano. Foi utilizado o método dos Mínimos Quadrados Recursivos para realizar a identificação em tempo real a partir de uma estrutura pré-definida para cada elo do robô. O controlador apresentado baseia-se na minimização de uma função de custo sintetizada em função do sistema e da dinâmica desejada para a malha de controle, através de uma saída generalizada $\phi(t)$. A atuação dos controladores apresentados foi considerada satisfatória já que os resultados experimentais obtidos atenderam as especificações de desempenho impostas ao sistema.

Taghizadeh *et al* (2010), projetaram um controlador adaptativo PD multi-modelo num atuador pneumático de carga variável com uma entrada e uma saída, considerando um comportamento quase linear do sistema. Para uma série de cargas consideradas, um modelo linear foi identificado e o controlador PD foi aplicado ao sistema. Posteriormente, uma mudança no algoritmo foi realizada para determinar o melhor modelo e selecionar o controlador correspondente em qualquer condição de carga. Os

resultados experimentais indicaram um alto desempenho do controlador multi-modelo em condições de carga variável.

Meira, A. S. (2010), desenvolveu na sua dissertação projetos de controladores adaptativos do tipo Dahlin Variância Mínima (DMV) com a técnica de Favier e Hassani, que foram implementados de forma desacoplada para obter o controle de posição dos elos de um robô manipulador eletropneumático cartesiano de 3GDL. O processo de identificação em tempo real foi realizado através do método dos Mínimos Quadrados Recursivos com o objetivo de encontrar o modelo matemático representativo do sistema. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que a resposta do sistema depende diretamente dos valores escolhidos para os parâmetros de Dahlin p_ρ e os polinômios de projeto $Q_\rho(z^{-1})$. No mesmo ano, SOUZA, O. B. projetou e implementou um controlador DMV no mesmo equipamento, obtendo resultados satisfatórios já que o controlador implementando seguiu as especificações de desempenho impostas ao sistema.

Vale, V. A. C. (2011), projetou e implementou controladores adaptativos do tipo GPC com restrição da variável de controle e GPC híbrido nos elos de um robô cartesiano de três graus de liberdade planar. Os resultados visando o controle das posições dos elos do manipulador obtidos para as variações desse controlador não foram satisfatórias, portanto a autora aplicou diferentes estratégias para melhorar o desempenho do controlador.

Pinto, C. R. A. (2011), desenvolveu em sua tese de doutorado projetos de controles adaptativos que foram implementados em dois elos de um robô manipulador eletromecânico de 5GDL. O sistema foi considerado não linear e os dois elos foram trabalhados de forma acoplada, onde seus parâmetros foram identificados pelo método dos Mínimos Quadrados Recursivos e a técnica de controle utilizada foi a polinomial proposta por KUBALCIK e BOBÁL (2006). Os resultados apresentados baseiam-se na implementação dos controladores adaptativos centralizados e descentralizados, utilizando a técnica polinomial, com e sem a ação de integradores.

Atia K. R. (2013), propôs um novo controlador de modo deslizante para o ponto de ajuste no controle de robôs manipuladores. Nesta nova formulação o controlador não utiliza qualquer parte da dinâmica do robô manipulador na lei de controle. O

controlador utilizado é o Proporcional-Integral-Derivativo (PID) o qual garante que o erro tende a zero assintoticamente se não houver perturbações presentes na dinâmica do robô.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver projetos de controladores Proporcionais Derivativos, auto ajustáveis, via alocação de polos visando suas implementações descentralizadas nos elos de rotação e de translação de um robô manipulador de dois graus de liberdade planar considerados desacoplados, no intuito de adquirir o controle de posição dos elos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um programa em LabVIEW® para realizar a identificação do sistema pelo método do Mínimos Quadrados Recursivos e posteriormente escolher o modelo matemático que melhor representa a dinâmica dos elos do robô manipulador em estudo.
- Elaborar e implementar projetos de controladores PD, auto ajustáveis, via alocação de polos para os elos de rotação de translação do robô manipulador.
- Avaliar a eficiência dos controladores utilizados através dos resultados obtidos, observando se a implementação dos controladores PD nos elos de rotação e de translação atenderam as especificações impostas a esses sistemas.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos e 2 apêndices.

O Capítulo 2 contém a descrição do robô manipulador em estudo e as especificações técnicas dos seus componentes.

O Capítulo 3 é dedicado à modelagem matemática dos elos de rotação e translação do robô, onde a estimação dos parâmetros para o desenvolvimento do modelo matemático é realizado através do método dos Mínimos Quadrados Recursivos (MQR).

O Capítulo 4 apresenta os projetos e implementações dos controladores Proporcional Derivativo (PD), auto ajustável, via alocação de polos aplicados experimentalmente nos elos do robô manipulador.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões finais deste estudo com as propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros

No Apêndice A está contido toda a parte do desenvolvimento dos cálculos para obtenção da variável de controle discretizada.

O Apêndice B traz todos os programas utilizados desenvolvidos na plataforma LabVIEW® que foram criados para o progresso desse trabalho.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a descrição do sistema em estudo, um robô manipulador de dois graus de liberdade planar, que se encontra no Laboratório de Automação e Controle, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e foi projetado, construído e montado pelos professores e pesquisadores deste laboratório. A seção 2.2 descreve o robô manipulador em questão, assim como a bancada de testes e o seu sistema computacional. A seção 2.3 especifica as características técnicas dos componentes presentes no elo de rotação do robô. A seção 2.4 apresenta as especificações técnicas dos elementos que compõem o elo de translação presente no robô manipulador. E a seção 2.5 finaliza este capítulo com as devidas conclusões sobre os itens abordados.

2.2 DESCRIÇÃO DO ROBÔ MANIPULADOR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE PLANAR

A Figura 2.1 apresenta a máquina eletromecânica, objeto de estudo deste trabalho, que é o robô manipulador planar constituído de um elo rotacional e outro prismático.



Figura 2.1 - Robô Manipulador de 2GDL planar

O elo rotacional é composto por um ramo extenso, com seção transversal em formato de U, feito de alumínio e é acionado por um moto-redutor de corrente contínua. Este elo percorre uma trajetória de aproximadamente 190° e para ser posicionado é necessário que o motor receba um sinal de excitação analógico que varia entre 0 e 5V DC, onde por sua vez um potenciômetro operado pelas engrenagens funciona como um transdutor de posição angular, fornecendo a localização angular do ramo. Quando o robô recebe uma tensão entre 0 V e 2,38 V o elo rotacional se move no sentido anti-horário (avanço), se a tensão recebida pelo sistema estiver no intervalo de 2,42 V – 5 V o elo gira no sentido horário (retorno), se a tensão for de 2,4 V o elo permanece imóvel.

O elo prismático é um cilindro pneumático de dupla ação com haste simples que é fixado na parte interna do ramo em U e percorre um curso de aproximadamente 200 mm sendo acionado por uma válvula eletropneumática proporcional. A válvula é

alimentada por uma tensão de 24V DC e recebe um sinal de excitação analógico variando entre 0 e 5V DC, este sinal é utilizado para posicionar o êmbolo do cilindro controlando o fluxo de ar comprimido. Tensões entre os valores 0 V – 2,6 V fazem com que o êmbolo se mova no sentido de avanço (para frente) e no intervalo entre 2,65 V – 5 V o êmbolo retorna (se move para trás). Se a tensão recebida for de 2,63 V o êmbolo permanece estático. A localização da haste do cilindro é dada pela régua potenciométrica, que serve como um transdutor linear de posição.

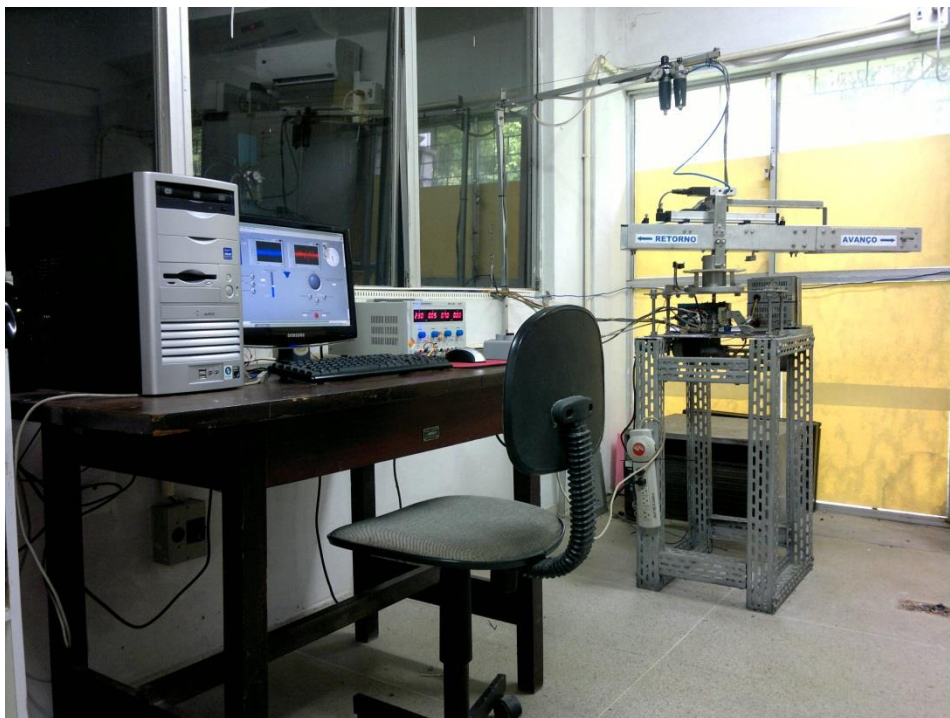


Figura 2.2 - Bancada de Testes

A Figura 2.2 mostra uma visão geral da bancada de testes montada, esta é composta por um computador, uma fonte variável de tensão contínua, um sistema de aquisição de dados e o robô manipulador. O computador é utilizado, em conjunto com a placa de aquisição, para enviar os sinais de excitação para os elos de rotação e de translação e receber os sinais de resposta do potenciômetro e da régua potenciométrica. Esses sinais são gerados e lidos pelo programa desenvolvido na plataforma LabVIEW®.

O computador utilizado no experimento possui um processador Pentium Dual-Core de 1,73 GHz com 1024 MB de Memória RAM. O processo de comunicação entre

este equipamento e o robô ocorre por intermédio de uma placa de aquisição de dados que faz a *interface* dos algoritmos de identificação e controle com a planta através dos conversores D/A (digital/analógico) e A/D (analógico/digital). Esta placa recebe os sinais de resposta do potenciômetro e da régua potenciométrica e envia os sinais de excitação para o amplificador e para a válvula que acionam os elos de rotação e de translação respectivamente. A Tabela 2.1 apresenta as especificações técnicas da placa de aquisição de dados.

Tabela 2.1 - Especificações da placa de aquisição de dados

Modelo/Fabricação	NI USB 6008/<i>National Instruments</i>
Canais de entradas analógicas	4 canais
Canais de saída	2 canais
Resolução	12 bits
Taxa de amostragem	10 kS/s
Faixa de tensão de entrada	± 10 V
Faixa de tensão de saída	0 a 5 V
Corrente de saída	5 mA
Transferência de dados	USB

Um esquema ilustrativo da bancada de testes é mostrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Esquema ilustrativo da bancada de testes

2.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SERVOPOSICIONADOR DO ELO DE ROTAÇÃO

A Figura 2.4 apresenta o servoposicionador do elo de rotação é constituído pelos seguintes componentes: amplificador de potência (1), motor de corrente contínua (2), transdutor de posição angular (3) e as engrenagens (4).

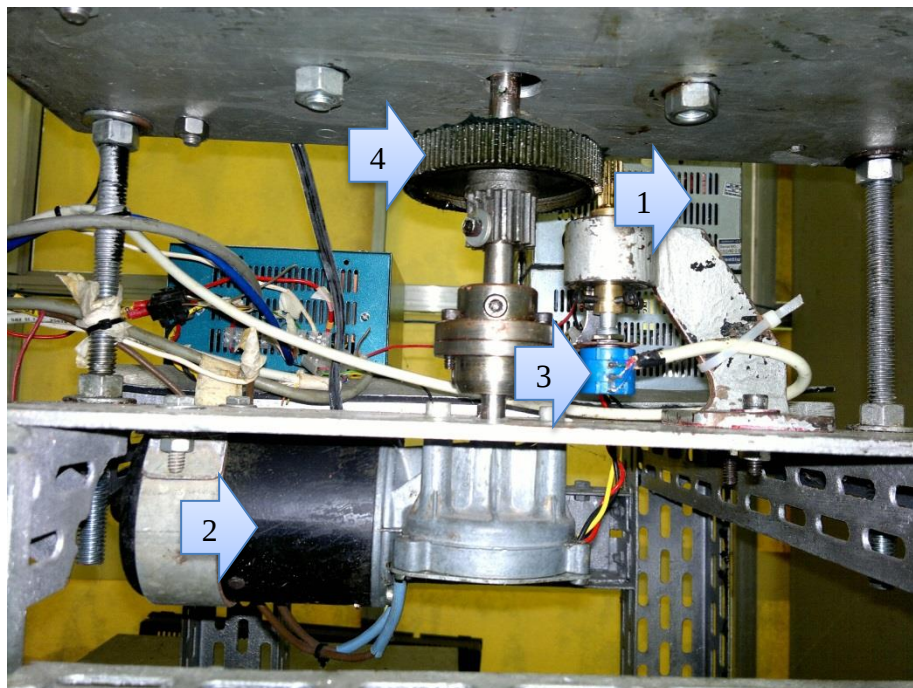


Figura 2.4 - Componentes do elo rotacional

1. **Amplificador de potência:** Este componente fornece a potência necessária para o acionamento do motor e a polaridade adequada para que o seu funcionamento seja no sentido desejado. A tensão aplicada nos seus terminais de entrada é que define o sentido de rotação. A relação entre a tensão de excitação versus a amplitude e polaridade da tensão de saída do amplificador é mostrada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tensão de excitação versus tensão de saída do amplificador

Tensão de excitação (V)	Tensão de saída	Sentido de rotação
0	-12	Anti-horário
5	0	Parado
10	12	Horário

2. **Motor de corrente contínua:** Motor de imã permanente controlado pela armadura e tensão nominal de alimentação de 12 V CC.
3. **Transdutor de posição angular:** Converte o número de voltas em uma tensão elétrica, que é lida pelo sistema de aquisição de dados. O transdutor possui uma variação angular múltivoltas, que fornece um sinal de resposta correspondente ao número de voltas do seu cursor, este fica acoplado ao eixo do motor que aciona o elo, ou seja, fornece a informação referente a posição angular do elo de rotação. A Tabela 2.3 apresenta as especificações técnicas deste componente.

Tabela 2.3 - Especificações técnicas do transdutor de posição angular

Modelo/Fabricante	WXD3590/TRIMMER®
Resistência elétrica	10K Ω $\pm$ 10%
Tensão de alimentação	5 V CC
Curso efetivo	Dez voltas

A partir dos dados coletados em laboratório, foi possível fazer um equacionamento de uma função linear que relaciona os valores do deslocamento angular do eixo motor com a tensão no sistema de unidade SI conforme Equação 2.1.

$$\theta = 68.744 \times V_{Tensão} - 88.459 \quad (2.1)$$

onde:

θ : é o deslocamento do transdutor potenciométrico em graus;

$V_{\text{tensão}}$: é o valor da tensão medida pelo transdutor potenciométrico dada em volts;

4. **Engrenagens:** São os componentes que coincidem o número de rotações do cursor do transdutor com o número de rotações do eixo do motor. Quando o cursor do transdutor completa dez voltas o elo rotacional descreve uma volta ou um ângulo de 360° , ou seja, a relação é de 10:1.

2.4 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS COMPONENTES DO SERVOPOSICIONADOR DO ELO DE TRANSLAÇÃO

O elo de translação é composto por uma válvula eletropneumática proporcional (5), um cilindro de dupla ação e haste simples (6), régua potenciométrica (7), uma fonte variável de corrente contínua (8), uma unidade de suprimento de ar comprimido (9) e uma unidade de conservação. Alguns componentes desse conjunto podem ser observados pela Figura 2.5.



Figura 2.5 - Componentes elo de translação

As especificações técnicas de cada elemento são descritas a seguir:

5. **Válvula eletropneumática proporcional:** Direciona de forma proporcional a vazão da linha de suprimento de ar para as câmaras do cilindro e destas para a atmosfera, acarretando uma diferença de pressão nos êmbolos do cilindro e assim, fornece a força necessária ao movimento. Os dados técnicos dessa válvula são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Dados técnicos da válvula eletropneumática proporcional

Modelo/Fabricante	MPYE-5-1/8 HF-010B/FESTO®
Tipo	5/3
Pressão absoluta de trabalho	0 a 10 ⁵ Pa
Vazão nominal	700 l/min (0,012 m ³ /s) ±10%
Temperatura de trabalho	+5 a 40°C, sem condensado
Temperatura ambiente	0 a 50°C
Tensão de alimentação	24V CC ±25%
Tensão de excitação	0 a 10 V CC, posição central em 5 V
Tempo de resposta	4,8 ms (238,1 Hz)
Potência máxima absorvida	20 W

6. **Cilindro de dupla ação e haste simples:** Executa o trabalho ao receber o ar comprimido direcionado pela válvula proporcional em uma de suas câmaras. As especificações técnicas do cilindro são mostradas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Dados técnicos do cilindro pneumático

Modelo/Fabricante	CWZA03273310X0400/WERK SCHOTT
Tipo	Dupla ação e haste simples
Pressão absoluta de trabalho	Até 10 bar
Faixa de temperatura de trabalho	-10°C – 150°C
Fluido	Ar comprimido filtrado
Amortecimento	Pneumático
Diâmetro do êmbolo	32 mm

7. **Régua potenciométrica:** Converte a variável deslocamento linear em uma tensão elétrica. Este componente se encontra acoplado a haste do cilindro, portanto, este transdutor de posição resistivo fornece o valor do deslocamento da haste. O transdutor é de fabricação FESTO® e de especificação NLO-POT-225-TFL, onde seus terminais são alimentados por uma tensão de 5 V CC. Com os dados obtidos em laboratório, foi possível criar uma equação da função linear que relaciona os valores do deslocamento do cursor da régua/haste do cilindro com a tensão, em unidades do SI conforme Equação 2.2.

$$d_{mm} = -42.553 \times V_{rp} + 208.5 \quad (2.2)$$

onde:

d_{mm} : deslocamento do cursor do transdutor/haste do cilindro medido em mm;

V_{rp} : valor da tensão medida em volts pela régua potenciométrica;

8. **Unidade de suprimento de ar comprimido:** É composta por um compressor de êmbolo com movimento linear que funciona de acordo com a pressão ajustada no pressostato que é responsável pelo acionamento de sua máquina motriz. Esta unidade é fixada num reservatório (pulmão) que tem como função armazenar o ar comprimido e equalizar as pressões das linhas de consumo. Suas especificações técnicas são observadas através da Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Especificações técnicas da unidade de suprimento de ar comprimido

Modelo/Fabricante	MS-2,5 ML/SCHULZ®
Capacidade de compressão	147,55 L/min
Pressão máxima	$8,3 \times 10^5$ Pa

9. **Unidade de conservação:** Contém um filtro com uma função de reter as impurezas e reduzir a umidade presente no ar, um elemento lubrificador de ar comprimido que libera de forma controlada certa quantidade de óleo lubrificante para realizar a lubrificação da parte interna dos componentes pneumáticos do sistema e por último, um regulador de pressão que controla o nível da pressão a ser utilizada no valor desejável.

2.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o robô manipulador de dois graus de liberdade planar objeto de estudo deste trabalho, o qual foi descrito o seu funcionamento, as especificações técnicas dos elos que compõem esse equipamento, o sistema computacional, as unidades de tensão para ambos os elos e a unidade de suprimento de ar comprimido para o elo de translação.

As funções lineares encontradas que foram apresentadas nas Eq. (2.1) e Eq. (2.2) representam as equações que convertem o valor de tensão em volts, respectivamente, para graus e milímetros.

CAPÍTULO 3

PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DO ROBÔ MANIPULADOR

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda todas as etapas necessárias que envolvem o processo de identificação de sistemas que vai desde a determinação do tempo de amostragem até a validação do modelo encontrado, passando pelas escolhas dos sinais de excitação para os elos de rotação e de translação do robô manipulador, o tipo de modelo matemático que melhor represente o sistema e a estimação dos parâmetros em tempo real pela técnica dos Mínimos Quadrados Recursivos (MQR).

O capítulo é finalizado com a seção 3.8 onde são apresentadas as devidas conclusões sobre os estudos desenvolvidos ao longo desta divisão.

3.2 PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Identificação de sistemas é um processo para obtenção de um modelo matemático adequado que melhor representará sistemas reais, a partir da relação de causa e efeito presente nos dados de entrada e saída obtidos do sistema (AGUIRRE, 2007). Segundo LJUNG (1996) a elaboração do modelo matemático de um sistema dinâmico deve ser baseado em medidas coletadas pelo ajuste de parâmetros e/ou do

modelo, até que a saída do sistema coincida o máximo possível com as amostras das saídas medidas.

Em parceria com a modelagem matemática, a identificação se torna fundamental na criação de um modelo matemático representativo do robô manipulador, estes deverão reproduzir as características essenciais desse sistema para a implementação de projetos de controles desenvolvidos que serão abordados posteriormente.

Aguirre (2007) divide o processo de identificação em cinco etapas:

- Testes dinâmicos e coleta de dados.
- Escolha da representação matemática a ser usada.
- Determinação da estrutura do modelo.
- Estimação de parâmetros.
- Validação do modelo.

Caso não se obtenha um resultado esperado é feita uma nova estimação até que o modelo seja validado. Nos tópicos a seguir é detalhada cada uma dessas etapas:

3.3 TESTES DINÂMICOS E COLETAS DE DADOS

É nesta fase que são adquiridos os dados do processo de identificação, para que isso ocorra é necessário excitar o sistema para obter as respostas dinâmicas. A fim de realizar a coleta de dados, foi definido *a priori* o tempo de amostragem e os sinais de excitação para os elos de rotação e translação do robô manipulador em questão.

3.3.1 Tempo de Amostragem

A determinação do tempo de amostragem é um ponto importante na identificação. Para que um sinal amostrado retenha algumas das características fundamentais do sistema original, é necessário que o tempo de amostragem seja suficientemente curto (AGUIRRE, 2007).

Isermann, R. et al (1980) citado por MALIK *et al.* (1991), sugere que o tempo de amostragem representado por T_a pode ser escolhido tomando como base o tempo de estabelecimento da resposta à entrada degrau aplicada ao sistema, este valor deve estar contido no intervalo dado pela Equação (3.1):

$$\frac{t_{95\%}}{15} \leq T_a \leq \frac{t_{95\%}}{5} \quad (3.1)$$

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

O tempo de amostragem foi obtido para cada elo do robô manipulador de forma simultânea. Primeiramente o elo rotacional foi colocado na posição inicial correspondente a 0° (zero graus), considerada como posição de avanço total e o elo de translação na posição de 0 mm, equivalente a posição de retorno total. Posteriormente excitou-se os sistemas ao mesmo tempo, com um sinal de entrada de 3,5 V de amplitude para o elo rotacional e um sinal de 0 V de amplitude para o elo de translação e uma pressão de 2 bar com a tensão do amplificador em 24 V. Ambos percorreram suas trajetórias ao mesmo tempo, ou seja, o avanço total do elo de translação correspondente a 183 mm (equivalente a 0,60 V) equivale ao retorno de aproximadamente 11° (este valor em tensão é de 1,44 V) do elo de rotação. Após o término desta prática os dados obtidos durante esse processo foram salvos e em seguida tiveram os gráficos plotados no Matlab®. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostram a resposta dos sistemas aos sinais de excitação escolhidos.

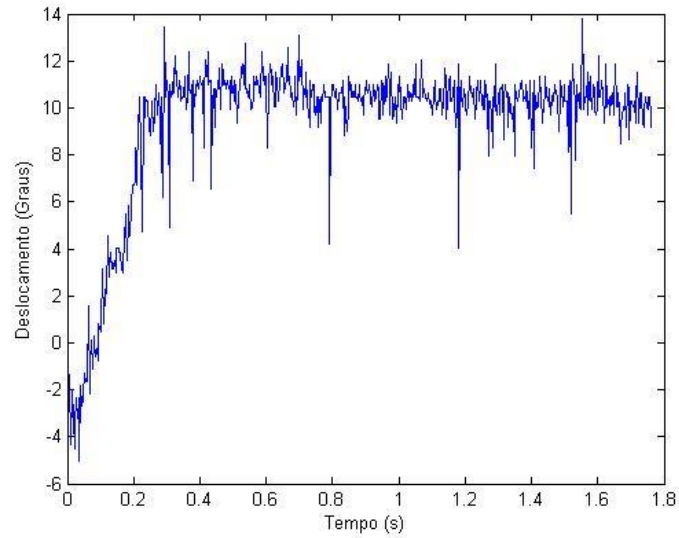


Figura 3.1 - Resposta ao degrau do elo de rotação em malha aberta

Com base na Figura 3.1 foi calculado o valor do $t_{95\%}$ e aplicado na Eq. (3.1) para encontrar o intervalo de tempo de amostragem correspondente ao elo rotacional, que está descrito na Eq. (3.2):

$$14 \text{ ms} \leq T_a \leq 43 \text{ ms} \quad (3.2)$$

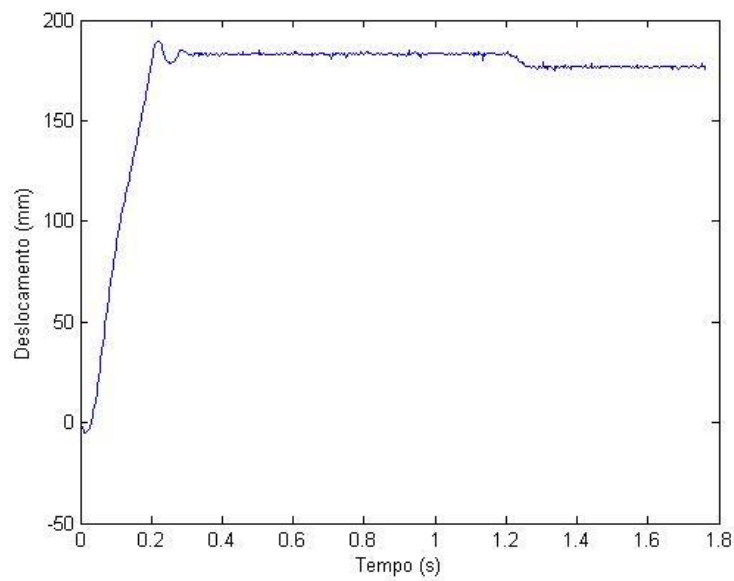


Figura 3.2 - Resposta ao degrau do elo de translação em malha aberta

A Eq. (3.3) mostra o intervalo de tempo de amostragem adquirido para o elo de translação a partir da curva obtida na Figura 3.2,

$$12 \text{ ms} \leq T_a \leq 38 \text{ ms} \quad (3.3)$$

A partir dos intervalos encontrados para os dois elos do robô nas Eq. (3.2) e Eq. (3.3), o tempo de amostragem comum escolhido para atender os dois sistemas em malha aberta foi de 15 ms.

3.3.2 Escolha do sinal de excitação

Para a escolha de um sinal de entrada que excite a dinâmica da planta do sistema, é fundamental que este contenha suficiente energia na faixa de frequências dominantes do sistema a ser identificado. (AGUIRRE, 2007). Para o estudo em questão, foi criada uma série de pulsos de tal forma que o elo de rotação saia da posição de 0° e percorra um deslocamento de aproximadamente 180° , posteriormente retorne a metade desse percurso, ou seja, 90° , e partindo desse ponto ele avança até um quarto de seu trajeto total cujo valor é 135° finalizando o seu movimento com um avanço para chegar ao seu ponto de partida.

Em conjunto a esse processo, o elo de translação foi excitado por uma sequência de pulsos que fez o pistão avançar e retornar durante todo tempo em que o elo de rotação gastou para realizar sua trajetória completa, ou seja, ambos estavam se movimentando simultaneamente.

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 mostram os sinais de excitação escolhidos para cada elo do robô manipulador.

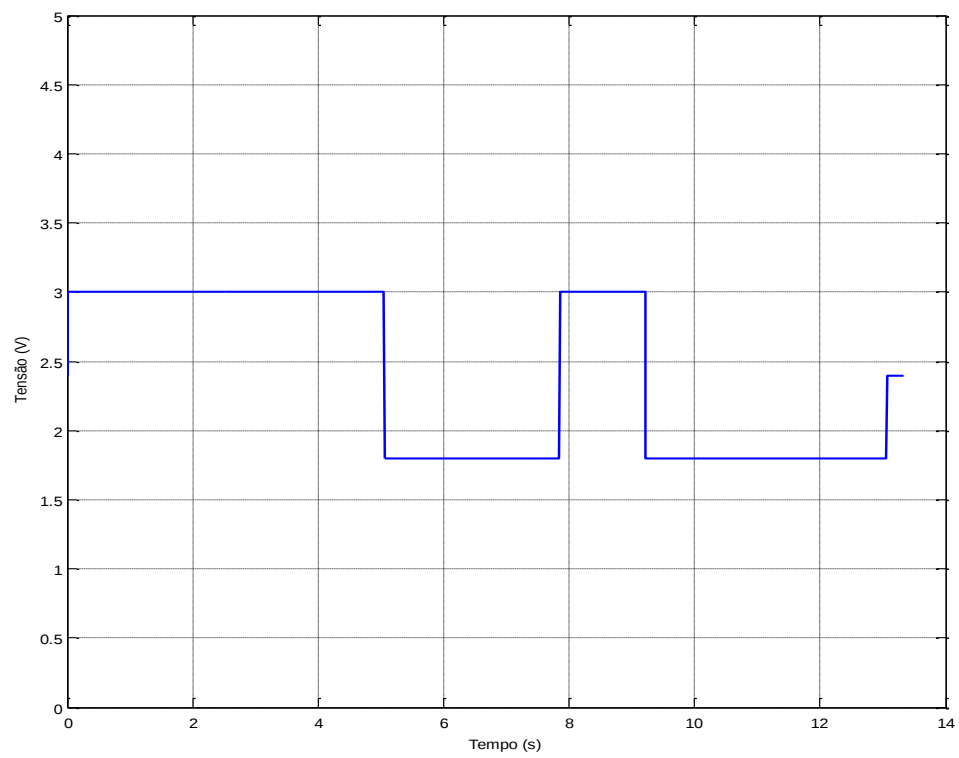


Figura 3.3 - Sinal de excitação aplicado ao elo de rotação

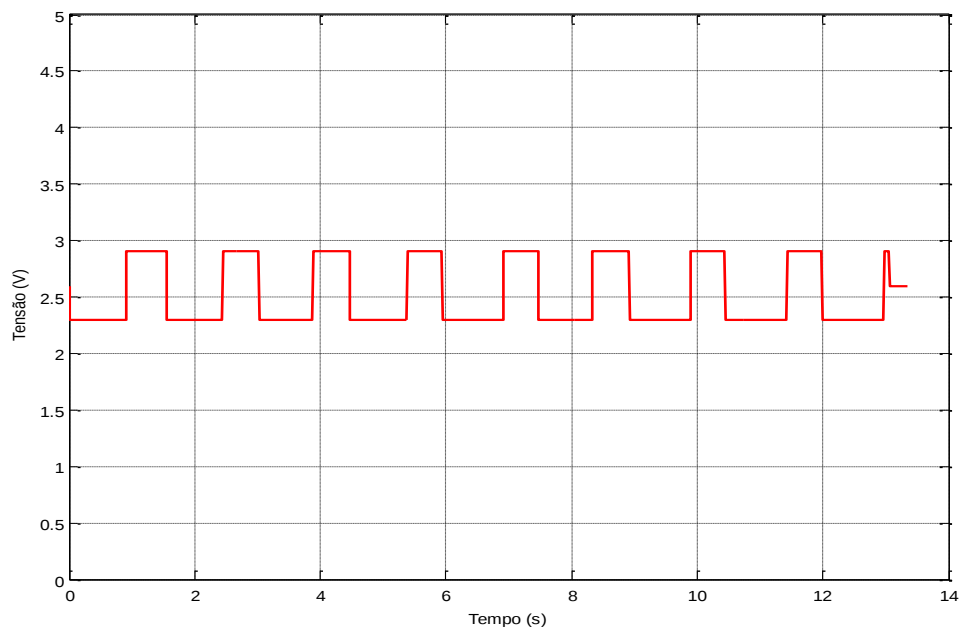


Figura 3.4 - Sinal de excitação aplicado ao elo de translação

3.4 ESCOLHA DA REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA A SER UTILIZADA

A modelagem matemática é voltada para o estudo de diversas formas de representar sistemas reais. Dentre as técnicas conhecidas, as modelagens do tipo caixa branca e caixa preta são as mais utilizadas. Na modelagem caixa branca admite-se um conhecimento prévio do sistema que será modelado, já na modelagem caixa preta não é necessário nenhum entendimento anterior do sistema, dessa forma a modelagem caixa preta foi escolhida para descrever a dinâmica do robô manipulador em estudo, uma vez que seu conteúdo é modelado a partir de dados experimentais do sistema. Para o modelo proposto foi considerado que o mesmo é dotado de um comportamento linear, ou seja, ele possui o mesmo tipo de comportamento independentemente do ponto de operação. (AGUIRRE, 2007).

Para a utilização de controladores, não é preciso encontrar um modelo matemático exato, mas um modelo adequado a determinada aplicação. Na prática, considera-se que processos reais não necessitam obrigatoriamente de modelos complexos (COELHO e COELHO, 2004 apud HANG E CHIN, 1991; GESSING, 1996; LJUNG, 1999).

Na identificação do robô manipulador em questão, será considerado que os elos são dinamicamente desacoplados; e desta forma cada elo será identificado como um sistema SISO (*single input single output*), utilizando-se o modelo matemático ARX (do inglês *autoregressive with exogenous inputs*) (AGUIRRE, 2007) com uma perturbação que é representada por um ruído modelado como um processo branco filtrado por um filtro auto-regressivo, para realizar a dinâmica do mesmo. Este pode ser representado no caso dinâmico com k indicando o instante considerado pela Equação (3.4).

$$y(k) = \varphi^T(k-1)\hat{\theta} + e(k) \quad (3.4)$$

onde, $\varphi^T(k-1)$ é o vetor de medidas representado pelas variáveis regressoras calculadas até o instante $(k-1)$,

$$\varphi^T(k-1) = [-y(k-1) \dots -y(k-n_a) u(k-d) u(k-d-1) \dots u(k-d-n_b)] \quad (3.5)$$

e, $\hat{\theta}$ é o vetor de parâmetros do sistema a serem estimados,

$$\hat{\theta} = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{n_a} \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n_b}] \quad (3.6)$$

Sendo, n_a , n_b e d o número de polos, o número de zeros e o atraso de transporte do sistema, respectivamente. O sinal de resposta do sistema está representado por $y(k)$, o sinal de entrada por $u(k)$, $e(k)$ é o ruído branco e a_i e b_j são os parâmetros do modelo.

Os sinais de entrada e saída do elo rotacional do robô manipulador são compostos pelas variáveis $u_1(k)$ e $y_1(k)$, com $u_2(k)$ e $y_2(k)$ simbolizando os sinais de entrada e saída, respectivamente, do elo de translação.

3.5 DETERMINAÇÃO DA ESTRUTURA DO MODELO

Nesta fase, é realizada a escolha de um valor adequado para a ordem do sistema. Se essa ordem for maior do que a ordem efetiva do sistema real, então irá ocorrer o cancelamento de polos e zeros na função de transferência do sistema (AGUIRRE, 2007). Para a escolha do melhor modelo representativo dos elos de rotação e de translação do robô manipulador foram utilizados índices de desempenho baseados nos valores calculados pelas Equações (3.7), (3.8) e (3.9):

$$SEQ = \sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \quad (3.7)$$

onde N representa o número de amostras utilizadas durante o processo e $\hat{y}$ é a resposta estimada do sistema.

O valor calculado pelo Somatório do Erro Quadrático (SEQ) diminui a fim de se obter um melhor ajuste à medida que a ordem do modelo utilizado na estimação paramétrica é aumentada. Se a diminuição desse valor não for significativa, então prevalece o modelo de ordem menor (COELHO e COELHO, 2004).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2}{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (3.8)$$

A Equação (3.8) representa o cálculo do Coeficiente de Correlação Múltipla, onde o $\bar{y}$ é a média das N amostras da experimentação. Uma exata adequação do modelo para os dados medidos durante o processo ocorre quando o valor de R^2 é igual a 1. Para muitas aplicações práticas em identificação o valor de R^2 entre 0.9 e 1 pode ser considerado satisfatório (COELHO e COELHO, 2004).

$$AIC = N \ln \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \right] + 2 p_N \quad (3.9)$$

Onde, p_N representa o número de parâmetros do modelo.

Segundo Aguirre (2007) a medida que a ordem do modelo é alterada o Critério de Informação de Akaike (AIC) atingirá um mínimo para um determinado número de parâmetros no modelo, quando isso ocorrer o procedimento pode ser finalizado.

Carvalho (2009) realizou estudos significativos para a seleção da ordem do modelo adequada para os elos de rotação e de translação do robô manipulador em estudo. Para essa seleção, após ser feita a identificação paramétrica do sistema, efetuou-se uma análise comparativa dos valores do critério de informação de *Akaike* (AIC), os coeficientes de correlação múltipla (R^2) e os valores da soma do erro quadrático (S_n) para modelos pré-selecionados de 1º, 2º, 3º e 4º ordem. Os resultados obtidos mostraram que os modelos de 2º ordem definidos por $n_a=2$, $n_b=1$ e $d=1$ para ambos os elos, se ajustam melhor aos dados de entrada/saída do sistema, possibilitando uma descrição mais exata da dinâmica do manipulador.

As Equações (3.10) e (3.11) representam a função de transferência de 2ª ordem discretizada do elo rotacional e elo prismático do robô manipulador, respectivamente,

$$F_r(z) = \frac{b_0 z^{-1} + b_1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3.10)$$

$$F_p(z) = \frac{b_2 z^{-1} + b_3}{1 + a_3 z^{-1} + a_4 z^{-2}} \quad (3.11)$$

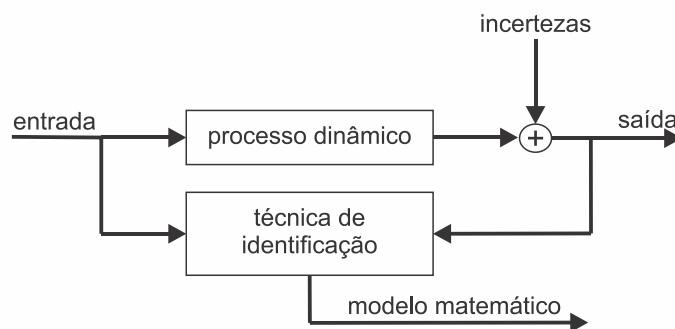
Onde, os parâmetros a_n e b_m são estimados a partir do MQR e compõem o vetor de parâmetros θ , dado pelas Equações (3.12) e (3.13).

$$\theta_1 = [a_1 \quad a_2 \quad b_0 \quad b_1] \quad (3.12)$$

$$\theta_2 = [a_3 \quad a_4 \quad b_2 \quad b_3] \quad (3.13)$$

3.6 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

A estimação de parâmetros é um procedimento numérico que determina os valores dos parâmetros desconhecidos do modelo, sendo expresso como um problema de otimização, cujo melhor modelo será aquele que se ajusta às medidas para um dado critério. Um modelo pode ser considerado adequado quando a resposta do sistema estimado reflete corretamente a resposta do sistema real ou quando o erro cometido no ajuste está em valores preestabelecidos (COELHO e COELHO, 2004). A Figura 3.5 mostra o processo de ajuste de parâmetros de um modelo estimado de forma que o erro entre a resposta do sistema e do modelo seja mínimo.



Fonte: Coelho e Coelho, 2004

Figura 3.5 - Diagrama de blocos de um processo de identificação de ajuste do modelo.

O algoritmo escolhido para realizar a estimação dos parâmetros foi o método de Mínimos Quadrados Recursivos (MQR) que é uma derivação do método principal denominado de Mínimos Quadrados (MQ), onde este procedimento é um dos mais conhecidos e mais utilizados nas diversas áreas da ciência e tecnologia (AGUIRRE, 2007). A formulação dos Mínimos Quadrados teve origem no final do século XVIII nos trabalhos de Gauss sobre estudos astronômicos para a previsão da trajetória dos planetas e cometas a partir das observações realizadas (LJUNG e SÖDERSTRÖM, 1983).

O estimador dos Mínimos Quadrados Recursivos é um método muito satisfatório na implementação de controladores adaptativos em tempo real, por conseguir estimar os

parâmetros do sistema de forma iterativa, com o modelo do sistema sendo atualizado a cada período de amostragem quando as novas medidas estão disponíveis (COELHO e COELHO, 2004). Para a implementação do MQR, é considerado *a priori* que a ordem do modelo é conhecida e que as amostras das medidas de entrada/saída são disponibilizadas a cada período de amostragem no universo da experimentação (COELHO e COELHO, 2004 apud ROFFEL et al., 1989; ASTRÖM e WITTENMARK, 1995; COELHO et al., 1999). O modelo que foi utilizado é de 2º ordem, como ficou definido na seção anterior.

O conjunto de equações que compõe o estimador dos MQR é definido a seguir, onde são comparadas a estimativa baseada nas medidas em instantes de tempo que variam de 1 (*um*) até $k = N$ com a estimativa constituída nas medidas nos instantes de 1 (*um*) até $(k + 1)$ (COELHO e COELHO, 2004).

A Eq. (3.10) calcula o vetor de parâmetros estimados,

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1)\{y(k+1) - \varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k)\} \quad (3.10)$$

O ganho do estimador é obtido através da Eq. (3.11),

$$K(k+1) = P(k) - \frac{P(k)\varphi(k+1)}{\lambda + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (3.11)$$

A matriz de covariância pode ser calcula pela Eq. (3.12),

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)\varphi(k+1)\varphi^T(k+1)P(k)}{\lambda + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (3.12)$$

Onde: λ é o fator de esquecimento e assume valores entre 0,9 e 1, para o MQR padrão λ recebe o valor 1.

Para a estimação dos parâmetros dos elos de rotação e de translação do robô foi desenvolvido um programa computacional na plataforma LabVIEW® composto pelas equações Eq. (3.5) e Eq. (3.6), equações Eq. (3.10), Eq. (3.11) e Eq. (3.12) que definem o algoritmo MQR e pelas Eq. (3.7), Eq. (3.8) e Eq. (3.9) que representam o cálculo dos índices de desempenho do modelo estimado, considerando o modelo de 2º ordem com $n_a = 2$, $n_b = 1$ e $d = 1$. Durante todo o processo ambos os elos foram excitados de forma simultânea pelos sinais de entrada definidos na seção 3.3.2 utilizando um tempo de amostragem igual a 15 ms. Inicialmente os parâmetros do modelo foram considerados nulos, a matriz de covariância é igual a uma matriz identidade cuja dimensão é definida pelo número de parâmetros do modelo com sua diagonal principal multiplicada por 10^4 e o fator de esquecimento λ recebe valor igual a 1. Os sinais de entrada foram enviados para os elos e os sinais de resposta correspondente a posição de cada elo foram recebidos e funcionam como dados de entrada para o algoritmo de estimação dos parâmetros em tempo real. Após todo o desenvolvimento do programa para efetuar o cálculo dos parâmetros para cada elo de forma independente, foram salvos em arquivo todos os dados e resultados onde posteriormente os gráficos correspondentes a esses dados foram plotados através de um programa computacional desenvolvido na plataforma Matlab®.

As respostas real e estimada de ambos os elos são apresentadas na Figura 3.6 e na Figura 3.7 para o modelo de 2º ordem.

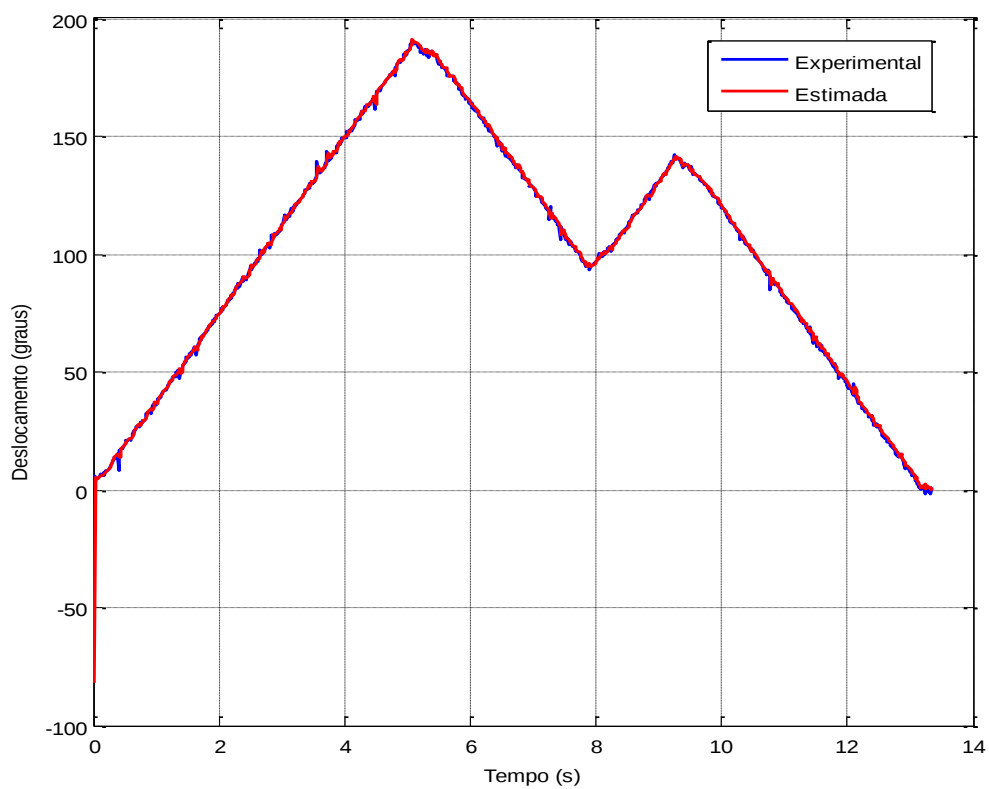


Figura 3.6 - Resposta real e estimada do elo rotacional em malha aberta

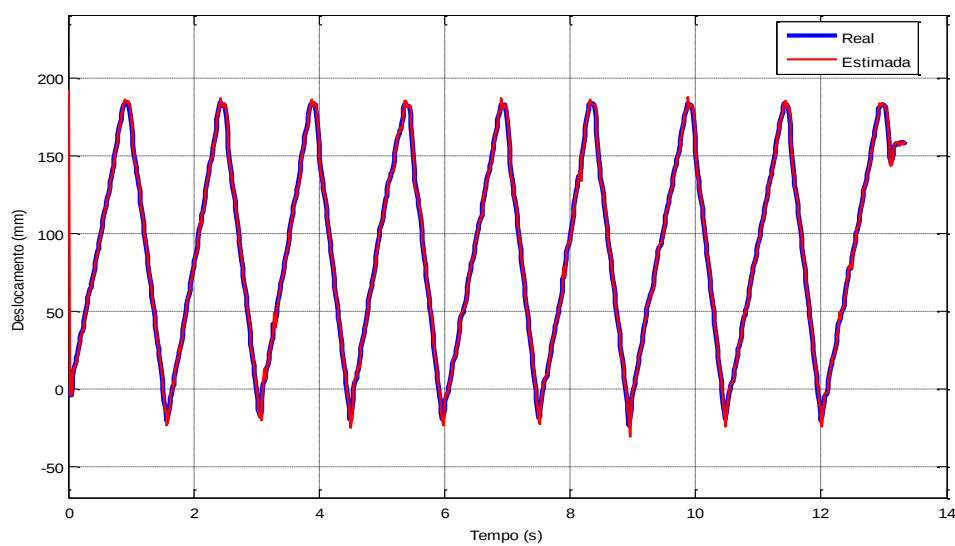


Figura 3.7 - Resposta real e estimada do elo de translação em malha aberta

A Figura 3.8 e a Figura 3.9 mostra a evolução dos parâmetros ao longo do tempo para os elos de rotação e de translação respectivamente.

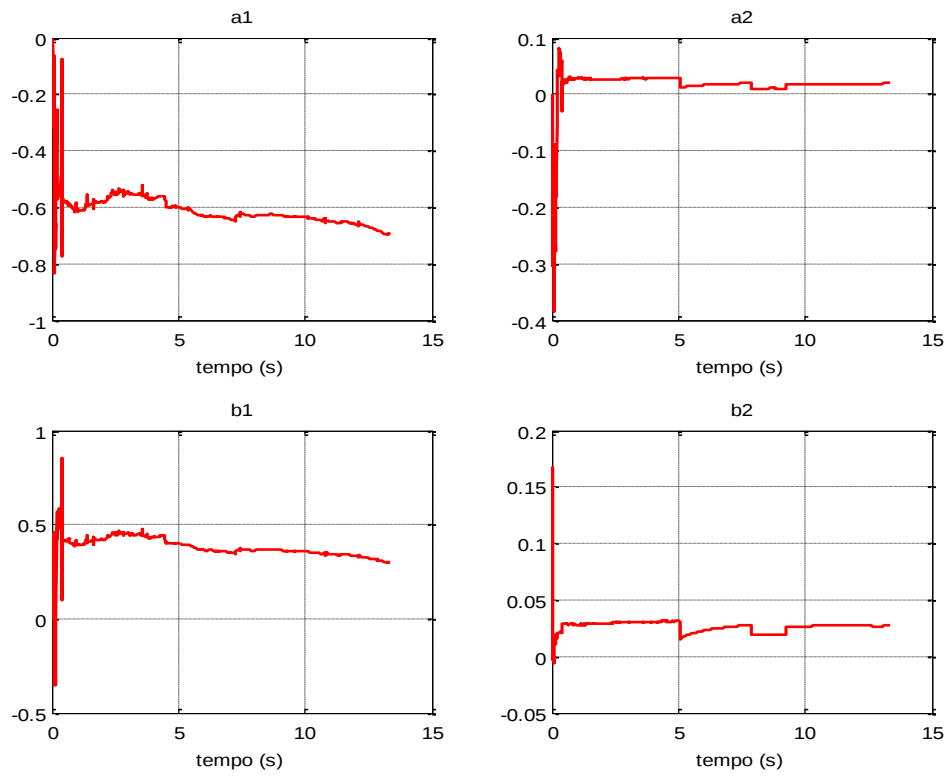


Figura 3.8 - Parâmetros estimados do elo rotacional

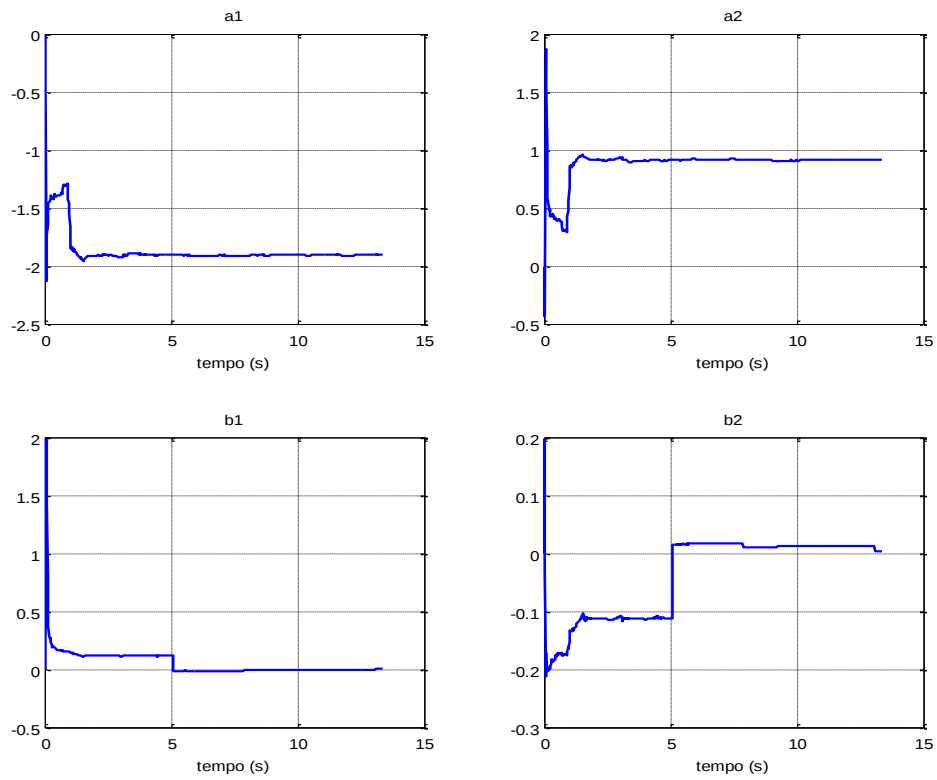


Figura 3.9 - Parâmetros estimados do elo de translação

3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO

O estudo desenvolvido por CARVALHO (2009) no robô manipulador em questão visto na seção 3.5, serviu como orientação para a determinação da ordem do modelo, este trabalho provou que o modelo que melhor representa o sistema foi o de 2º ordem. Seguindo esta referência, os valores obtidos no presente estudo através do cálculo dos índices de desempenho correspondente ao elo rotacional para um sistema de 2º ordem foram $SEQ = 3,42649$, $R^2 = 0,992927$ e $AIC = -4927$ e para o elo de translação obteve-se os valores de $SEQ = 43,2631$, $R^2 = 0,976227$ e $AIC = -2675,24$. Analisando o valor do critério de correlação múltipla (R^2) de ambos os elos pode-se observar que é um valor satisfatório, pois está dentro do intervalo correspondente entre 0.9 e 1.

Outro fator que pode ser considerado para validar o modelo de 2º ordem são os gráficos das Figuras (3.6) e (3.7), onde o modelo estimado demonstra possuir as características dinâmicas similares a dos sistemas reais para ambos os elos. Dessa forma, conclui-se que o modelo de 2º ordem representa de forma satisfatória os elos do robô manipulador, portanto esses modelos serão utilizados para os projetos dos controladores.

3.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram detalhadas as etapas para efetuar a estimação dos parâmetros do sistema, começando pela obtenção do tempo de amostragem e dos sinais de excitação para os elos do manipulador robótico. Em seguida foi determinado o modelo matemático para representar o sistema, seguido da determinação da estrutura do modelo e da explicação do algoritmo desenvolvido na plataforma LabVIEW® para realizar a estimação dos parâmetros e finaliza com os critérios utilizados para validar a ordem do modelo escolhido.

CAPÍTULO 4

CONTROLADOR ADAPTATIVO PROPORCIONAL DERIVATIVO (PD)

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo se inicia com um breve contexto histórico sobre os controladores adaptativos e suas representações gerais em diagrama de blocos. Nas seções seguintes são apresentados os projetos e a implementação do controlador Proporcional Derivativo (PD), auto ajustável, via alocação de polos nos elos de rotação e de translação do robô manipulador.

O capítulo é finalizado com as conclusões referentes aos resultados experimentais obtidos através das implementações dos controladores projetados.

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CONTROLADORES ADAPTATIVOS

4.2.1 Contexto Histórico

Foi durante o século XVIII que surgiu o primeiro trabalho significativo de controle automático através de um regulador centrífugo construído por James Watt com o objetivo de controlar a velocidade de uma máquina a vapor (OGATA, 2010). Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos que são interconectados a fim

de produzir uma resposta desejada do sistema (NISE, 2002). A relação entre a entrada e a saída do sistema é uma representação de causa e efeito do processo (DORF, 2001).

Controle adaptativo é definido como sendo um controlador que pode alterar seu comportamento em resposta a mudanças da dinâmica do processo e a distúrbios. Segundo ASTRÖM e WITTENMARK (1995), o controlador adaptativo é constituído de parâmetros que são ajustáveis através de mecanismos específicos, seu surgimento se deu no início dos anos 50 através de uma extensiva pesquisa com o intuito de projetar pilotos automáticos para aeronaves de alto desempenho. Durante a década de 1960 as pesquisas desenvolvidas na área de teoria de controle contribuíram fortemente para o aprimoramento do controle adaptativo, com a introdução da teoria da estabilidade, espaço de estados e o desenvolvimento de sistemas de identificação. Os primeiros anos da década de 1970 foram considerados o renascimento do controle adaptativo com o surgimento de diversos esquemas de estimação combinados com diferentes métodos de projetos. As pesquisas desenvolvidas no final dos anos 80 e início dos anos 90 deram novas contribuições a robustez dos controladores adaptativos. Houve um crescimento significativo no número de experimentos com controladores adaptativos em laboratórios e indústrias, essa interação entre a teoria e a experimentação resultou em um acentuado desenvolvimento teórico-experimental, com isso os controladores adaptativos passaram a ser comercializados (ASTRÖM e WITTENMARK, 1995).

4.2.2 Tipos de controladores adaptativos

Os controladores adaptativos existentes podem ser divididos em diferentes tipos como o de Ganho Escalonado (GS – Gain Scheduling), Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC – Model-Reference Adaptive Control) e Regulador Auto - Sintonizado (STR – Self-Tuning Regulators).

Os controladores de Ganho Escalonado (GS) surgiram da necessidade de desenvolver um sistema de controle de voo, cuja altitude do avião era medida por um sensor e esse valor utilizado como uma variável escalonada. Neste tipo de controlador, as variáveis mensuradas são utilizadas para alterar o ganho do controlador, ou seja, os parâmetros do controlador são alterados de acordo com as mudanças na dinâmica da

planta. No controlador adaptativo por modelo de referência (MRAC) procura-se determinar um mecanismo de ajuste para o controlador no intuito de fazer com que o sistema controlado se comporte como o modelo de referência para que consiga que representar a dinâmica desejada do sistema, ou seja, tenta fazer com que o valor do sinal de saída do sistema seja o mais próximo possível do valor do sinal de entrada. (ASTRÖM e WITTENMARK, 1995).

Os controladores adaptativos do tipo auto ajustável (STR) são desenvolvidos em tempo discreto, estes utilizam os parâmetros da modelagem matemática que são calculados pelo identificador e posteriormente através de uma malha adicional esses parâmetros são alterados a fim de compensar as variações ocorridas durante o processo (COELHO et al, 1988; ASTRÖM e WITTENMARK, 1995). As variações sofridas pela dinâmica da planta são acompanhadas pelo identificador e pelo controlador a cada período de amostragem (COELHO e COELHO, 2004). Esses controladores podem ser classificados em controle adaptativo indireto (ou explícito), cujos parâmetros do controlador são calculados a partir dos parâmetros identificados do sistema, e controle adaptativo direto (ou implícito), onde os parâmetros do controlador são identificados diretamente do sistema. Ambos os processos ocorrem a cada período de amostragem (AGUIRRE, 2007). As técnicas do controlador adaptativo auto ajustáveis mais conhecidas são Variância Mínima Generalizada (GMV), Variância Mínima (MV), Controle Preditivo Generalizado (GPC), controle Linear Quadrático Gaussiano (LQG) e Alocação de Pólos (PP).

4.3 Considerações sobre o controlador PID

Os controladores do tipo Proporcional, Integral e Derivativo, denominados PID, são os tipos de controladores mais presentes no cenário industrial. Cerca de 90 a 95% dos problemas de controle são solucionados empregando tais controladores. Esse fato ocorre devido a fácil implementação e ao baixo custo desses controles (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1996). Nos casos onde não se tem o conhecimento do modelo matemático da planta do processo, o uso do controlador PID se mostra o método mais útil para obter o controle desse sistema (OGATA, 2010).

O esquema do controlador PID é exemplificado através da Figura 4.1.

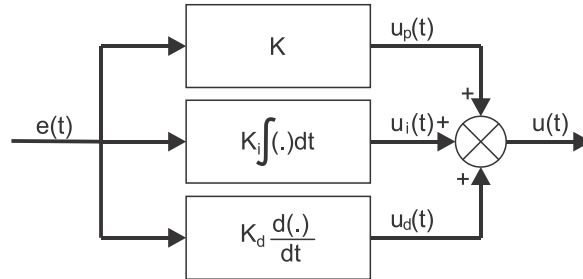


Figura 4.1- Esquema de um controlador PID

A lei de controle do controlador PID no domínio do tempo pode ser descrita matematicamente pela Equação 4.1 (BOBÁL *et al*, 2005),

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

onde,

$u(t)$: é a variável de controle;

$e(t)$: é a variável erro de trajetória;

K_p : é o ganho proporcional;

T_i : é o tempo integral;

T_D : é o tempo derivativo;

Este controlador é dividido em três modos, o Proporcional, Integral e Derivativo que serão definidos a seguir:

4.3.1 Modo Proporcional

O termo proporcional faz com que a variável de saída do controlador seja proporcional ao valor do erro efetivo. A resposta controlada por esse termo é ajustada multiplicando-se o erro $e(t)$ pela constante de ganho proporcional K_p .

O termo proporcional é dado pela Equação (4.2),

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.2)$$

O valor escolhido para o ajuste da variável de ganho proporcional tem forte influência na ação de controle. Por este tipo de modo apresentar um erro em estado estacionário, a escolha do ganho proporcional deve ser realizada de forma criteriosa, se o valor escolhido para K_p for muito pequeno o controlador não conseguirá responder às perturbações do sistema, porém, se este valor for muito alto o sistema irá tender para a instabilidade, tornando o controlador mais oscilatório. Uma escolha muito alta no valor do ganho também pode acarretar uma formação de sobressinal no sistema. (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995; OGATA, 2010).

4.3.2 Modo Integral

Essa ação de controle gera uma eliminação do erro em estado estacionário que ocorre com o uso do controlador de ganho proporcional. A Equação (4.3) mostra a ação de controle do modo integral,

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (4.3)$$

O termo integral responde a erros calculados em tempos anteriores, neste caso pode ocorrer uma ultrapassagem no valor da referência. (ASTRÖM e WITTENMARK, 1995)

4.3.3 Modo Derivativo

A ação de controle do modo derivativo é proporcional à taxa de variação do sinal de erro ao longo do tempo e ao ganho derivativo T_D .

O modo derivativo é dado pela Equação (4.4).

$$u(t) = T_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.4)$$

Essa ação do controlador serve para atenuar a magnitude do sobre sinal produzido pelo modo integral, devido ao fato dela agir na previsão da variação do erro. A diferenciação no sinal de erro causa ruído ao sistema, se esse fator for somado a um valor alto do ganho derivativo o sistema torna-se instável (ASTRÖM e WITTENMARK, 1995).

4.4 Projeto do Controlador PD auto ajustável via Alocação de Polos para o Robô Manipulador de 2GDL Planar

Como os elos de translação e de rotação do robô manipulador funcionam de forma desacoplada, foram projetados controladores PD auto ajustáveis distintos via alocação de polos como mostrado na seção A.2 do Apêndice A para cada elo do manipulador.

Para a execução do projeto desses controladores os polos de malha fechada desejados do sistema devem ser encontrados, esses polos são caracterizados pelo fator

de amortecimento relativo ζ e a frequência natural ω_n . A equação característica desejada é dada pela Equação (4.5) (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995),

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (4.5)$$

O valor numérico do fator de amortecimento ζ pode ser encontrado através da Equação (4.6) (NISE, 2000).

$$\% ss = \exp \left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \cdot 100 \quad (4.6)$$

onde, % ss é o sobressinal, este valor é especificado de acordo com o desempenho que se deseja obter do sistema.

A frequência angular natural é determinada através da equação (4.7), substituindo o valor do fator de amortecimento calculado pela equação (4.6) e o tempo de estabelecimento t_s especificado (NISE, 2000).

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (4.7)$$

Segundo NISE (2000), de posse dos valores calculados de ζ e ω_n , os polos requeridos em malha fechada no domínio de s são calculados através da equação (4.8).

$$s = -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (4.8)$$

As especificações de desempenho escolhidas para serem impostas aos elos do robô manipulador são apresentadas na Tabela (4.1).

Tabela 4.1 - Especificações de desempenho dos elos de rotação e de translação

	Elo de Rotação	Elo de Translação
Sobressinal (ss)	5%	4,3%
Tempo de Estabelecimento (t_s)	3s	2s
Erro em Regime Permanente	±2%	±2%

Os valores de ζ e ω_n calculados a partir da substituição das condições de desempenho impostas ao elo de rotação nas Equações (4.6) e (4.7) foram respectivamente, 0,57 e 2,33. Para um melhor desempenho na resposta do sistema os valores de ζ e ω_n tiveram de ser ajustados para 0,99 e 2,5, aplicando esses valores na Equação (4.8), calcula-se os polos conjugados desejados do elo rotacional,

$$s_1 = -2,5432 \pm i0,2553 \quad (4.9)$$

Os polos contínuos da Equação (4.9) podem ser discretizados a partir da relação entre o domínio em z e o domínio em s dada pela Equação (4.10) (QUILES *et al*, 2002),

$$z = e^{sT_a} \quad (4.10)$$

onde, T_a é o tempo de amostragem dado em segundos (s).

Com a implementação do controlador, o sistema a ser controlado foi acionado em malha fechada e dessa forma o arranjo computacional, para a execução do programa, se torna mais complexa, portanto o tempo de amostragem calculado na seção 3.3.1 que foi de 15ms passou a ter o valor de 0,2s.

Substituindo na Equação (4.10) o tempo de amostragem por 0,2 segundos e s pelos polos conjugados calculados anteriormente, tem-se como resultado a Equação (4.11). Resolvendo a Equação (4.11), obtêm-se os polos discretos da Equação (4.13).

$$z_1 = e^{(-2,5432 \pm 0,2553 i) \cdot 0,2} \quad (4.11)$$

$$z_1 = e^{-2,5432 \cdot 0,2} \cdot (\cos(0,2553 \cdot 0,2) \pm i \sin(0,2553 \cdot 0,2)) \quad (4.12)$$

$$z_1 = 0,6005 \pm i0,0301 \quad (4.13)$$

Esses polos representam as especificações do sistema referente ao elo rotacional, a parte real representado por v_1 e a parte imaginária representada por w_1 são substituídos nas equações (A.18), (A.19), (A.20) para o cálculo dos parâmetros q_0 e q_1 do controlador PD.

Analogamente ao processo de cálculo utilizado para o elo de rotação, substituindo os valores de ζ e ω_n calculados a partir das especificações de desempenho imposta ao elo de translação obtêm-se os valores $\zeta \geq 0,57$ e $\omega_n \geq 3,48$ respectivamente. Os valores ajustados utilizados neste elo foram $\zeta = 0,70$ e $\omega_n = 3,7$, substituindo-os na Equação (4.8) encontram-se aos polos conjugados desejados no plano s referente ao elo de translação,

$$s_2 = -2,6180 \pm i2,6188 \quad (4.14)$$

A forma discreta dos polos contínuos para o elo de translação é obtida a partir da Equação (4.10) considerando que o tempo de amostragem foi de 0,2 segundos,

$$z_2 = 0,5130 \pm i0,2962 \quad (4.15)$$

A parte real de z_2 representada por v_2 e a parte imaginária por w_2 foram substituídas nas equações (A.18), (A.19) e (A.20) para o cálculo dos parâmetros do controlador PD referente ao elo de translação.

Os controladores PD auto ajustável via alocação de polos foram implementados no robô manipulador de dois graus de liberdade através do programa computacional *IdeconPD* desenvolvido na plataforma LabVIEW® objetivando seu uso na fase experimental desse estudo.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 mostram o esquema do controlador PD em conjunto com a identificação de parâmetros através do método do MQR para os elos de rotação e de translação respectivamente.

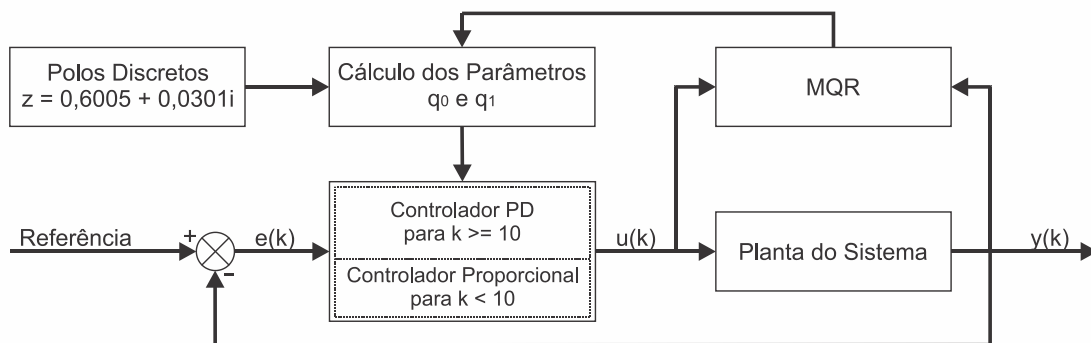


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do esquema de controle do elo rotacional

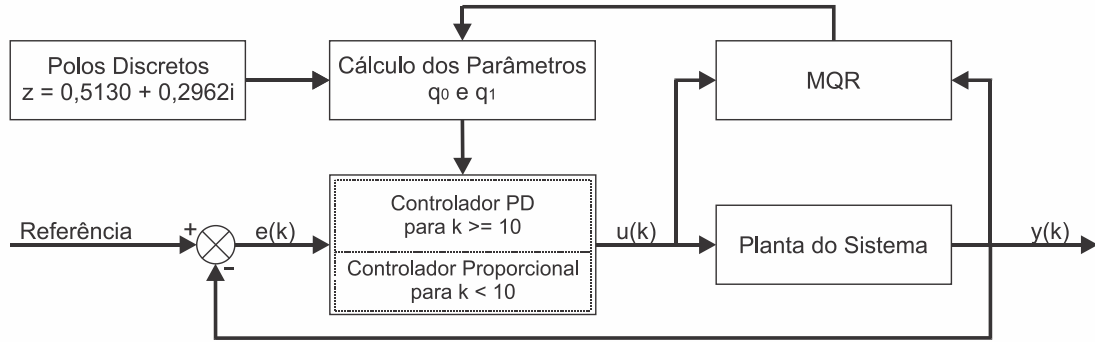


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do esquema de controle do elo de translação

Para realizar o teste experimental do controlador implementado no robô manipulador, posicionam-se os elos de rotação e de translação em pontos diferentes das posições iniciais dadas pelos *setpoints* (trajetos elaborados pelo projetista), o qual os elos deverão seguir e que são previamente definidos. Quando o sistema é acionado, ambos os elos tentam seguir os *setpoints*, neste momento os parâmetros da planta já começam a ser estimados, em tempo real, através do algoritmo do MQR. Nos primeiros 2 segundos o controlador que atua nesta fase inicial é o de ganho proporcional que foi definido anteriormente através da Equação (4.2), onde κ_p assume o valor de 1,2 para o elo de rotação e 0,5 para o elo de translação. O uso desse controlador é essencial para que ocorra uma estimação coerente da planta antes do controlador PD ser acionado. Os valores de κ_p foram determinados de forma criteriosa após terem sido realizados diversos testes experimentais utilizando apenas o controlador de ganho proporcional a fim de que o sistema seguisse os *setpoints* definidos para ambos os elos da forma mais eficiente possível, sem que os sistemas apresentassem erro de estado estacionário elevado ou sobressinal.

Durante todo o processo o algoritmo para o cálculo do MQR recebe os sinais de resposta “ y ” referente a posição real dos elos e o sinais de saída “ u ” calculados pelo programa são enviados para os elos do robô. Esses sinais são utilizados para estruturar o vetor de medidas dados pela Equação (4.16),

$$\varphi^T(k-1) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad u(k-1) \quad u(k-2)] \quad (4.16)$$

Em seguida o MQR realiza todos os cálculos necessários através das Equações (3.10), (3.11) e (3.12) para obter os parâmetros estimados dos modelos dos elos do robô. Inicialmente, os vetores de parâmetros possuem todos os valores nulos, as matrizes de covariância são matrizes identidade onde a diagonal principal é preenchida pelo valor 10^4 e o fator de esquecimento “ λ ” é igual a 1, dessa forma utilizou-se o MQR padrão. Todo esse processo ocorre a cada período de amostragem, cujo valor é 0,2 segundos.

Os parâmetros estimados pelo MQR mais os polos discretos computados para cada elo do manipulador foram utilizados para calcular os parâmetros p , q_0 e q_1 do controlador PD pelas Equações (A.18), (A.19) e (A.20). Paralelo a todo esse processo ocorreu o cálculo da variável $e(k)$ que é dada pela diferença entre o valor de referência fornecido pelo *setpoint* e o valor referente a posição atual do elo rotacional informado pelo potenciômetro e no caso do elo de translação este dado é fornecido pela régua potenciométrica. Com os parâmetros q_0 , q_1 e $e(k)$ calculados, encontra-se o sinal de controle $u(k)$ através da Equação (A.9) para cada elo do robô manipulador. Essas variáveis de controle são enviadas ao algoritmo do MQR e aos elos de rotação e de translação. Todo esse processo continua ocorrendo a cada período de amostragem até o momento em que os *setpoints* dos elos são concluídos.

4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PELA IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR PD NOS ELOS DO ROBÔ MANIPULADOR

Para a realização do experimento foram criados dois tipos diferentes de *setpoints*, um para o elo rotacional e outro para o elo de translação, a fim de avaliar o desempenho do controlador projetado em ambos os elos.

4.5.1 ELO DE ROTAÇÃO

Os polos discretos ajustados utilizados na implementação desse controlador foram $z_1 = 0,6005 \pm i0,0301$ e o valor do ganho K_{p1} do controlador proporcional que atuou no sistema rotacional nos primeiros 2 segundos foi de 1,2. O tempo de amostragem utilizado foi de 0,2 segundos. Todo o experimento durou 90 segundos.

Os resultados foram obtidos através da implementação do controlador PD no elo de rotação do robô manipulador com as especificações de desempenho impostas ao sistema onde o sobressinal máximo foi de 5% e o erro de regime permanente foi de $\pm 2\%$ com um tempo de assentamento equivalente a 3s de acordo com a Tabela 4.1 apresentada na Seção 4.4.

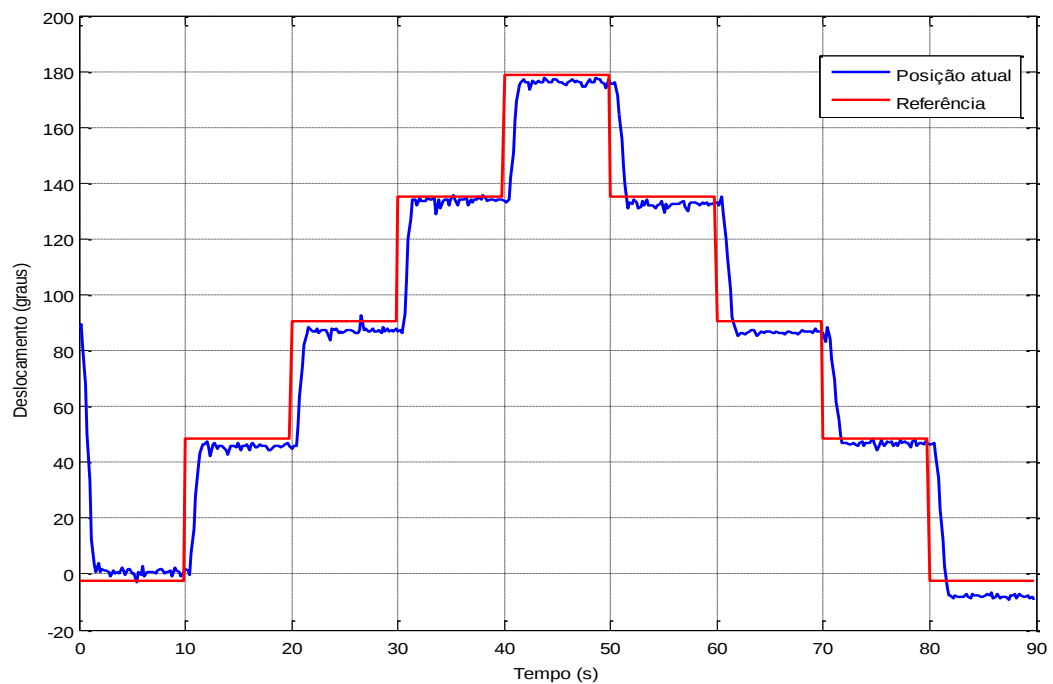


Figura 4.4 - Referência e Posição atual do Elo Rotacional em malha fechada

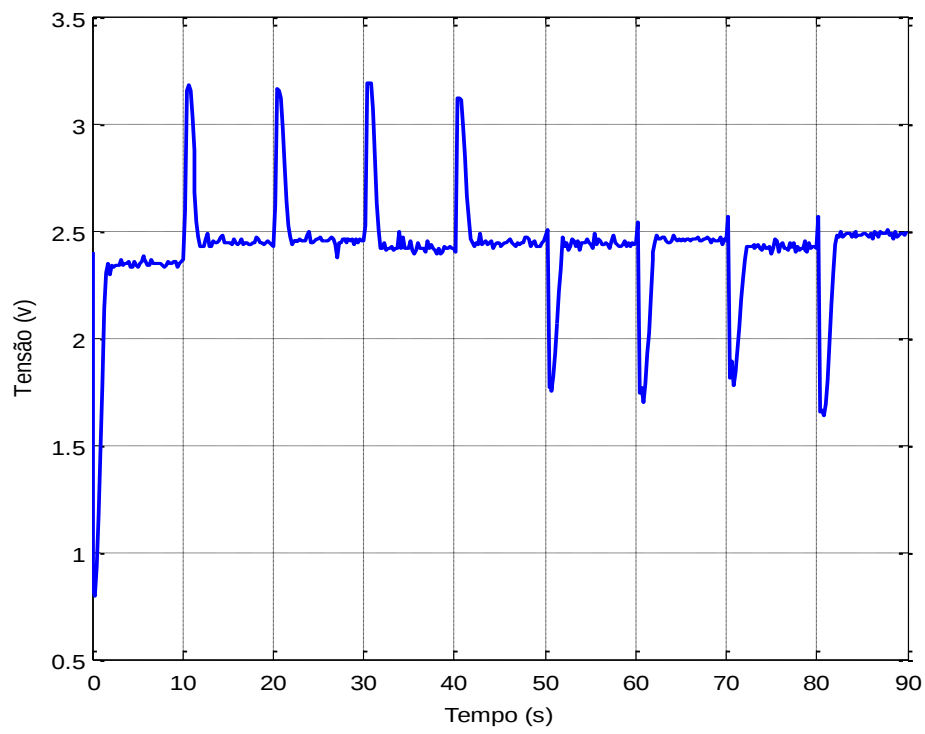


Figura 4.5 - Variável de controle do Elo Rotacional

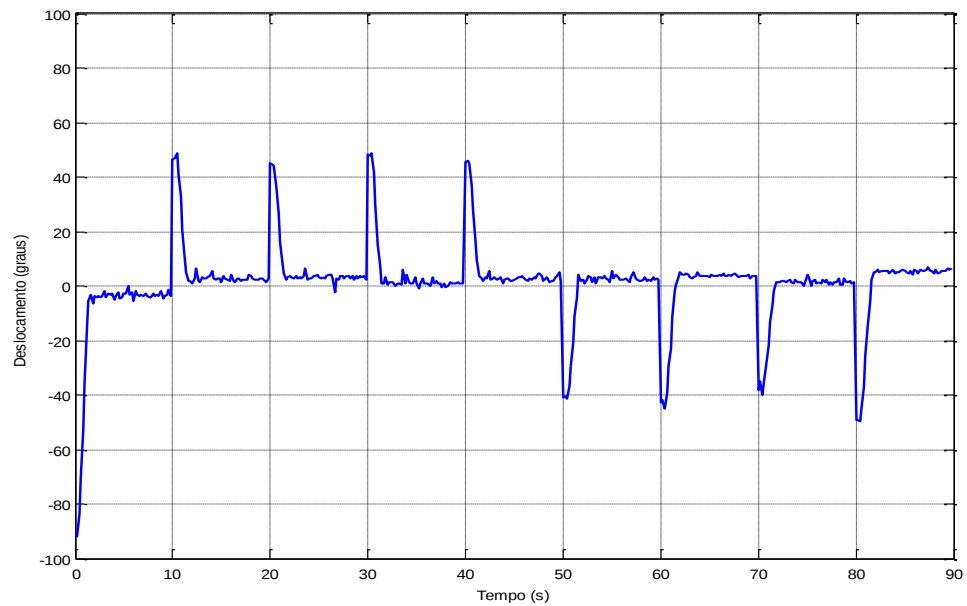


Figura 4.6 - Variável Erro de Saída do Elo de Rotação

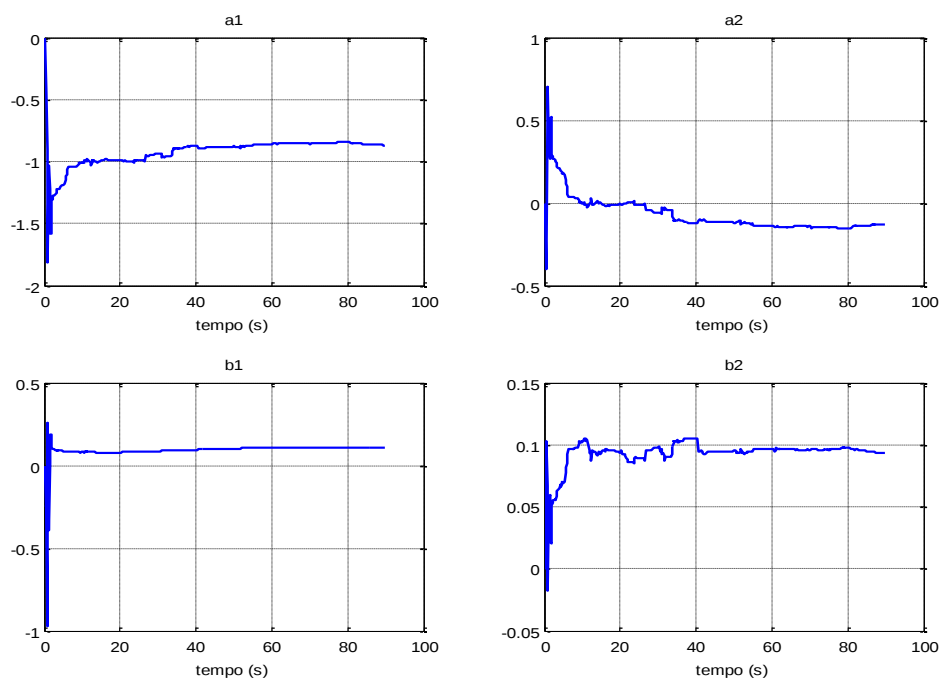


Figura 4.7 - Parâmetros Estimados do Elo Rotacional

A partir de uma análise crítica realizada através dos resultados obtidos mostrados pelas Figuras (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7) pode-se resumir o desempenho da implementação do controlador PD no elo rotacional pela Tabela (4.2).

Tabela 4.2 - Desempenho do elo Rotacional sob a ação do Controlador PD

Estágio	Intervalo (s)	Referência (graus)	Valor Real (graus)	Sobre Sinal Máximo (%)	Tempo de Assentamento (s)	Erro em regime permanente (%)
0	0 a 10	0°	0,62	-	1,4	1,375
1	10 a 20	45°	44,46	-	1,6	1,196
2	20 a 30	90°	89,37	-	1,8	1,402
3	30 a 40	135°	134,80	-	1,4	0,443
4	40 a 50	180°	179,40	-	1,8	1,334
5	50 a 60	135°	134,48	-	2,0	1,145
6	60 a 70	90°	89,13	-	2,6	1,928
7	70 a 80	45°	44,74	-	2,2	0,584
8	80 a 90	0°	-1,15	-	1,8	2,564

- Ausência de sobressinal

Os resultados obtidos mostraram que o desempenho do controlador PD auto ajustável via alocação de polos foi parcialmente satisfatório ao tentar controlar a trajetória do elo rotacional do robô manipulador em todos os estágios do *setpoint* elaborado. Analisando o gráfico da Figura (4.4) o estágio inicial 0 (zero) é onde ocorre a transição do controlador proporcional de ganho K_{p1} para o controlador PD, nesta fase estão sendo estimados os primeiros parâmetros da planta do sistema, por isso ocorreu um erro significativo entre a referência e a posição atual do elo do robô.

Em todos os estágios o elo não conseguiu atingir a posição exata dada pela referência no projeto do controlador, porém com exceção do estágio 8, todos os outros pontos atenderam as especificações de desempenho quanto ao erro em regime permanente, que possui uma faixa de tolerância de $\pm 2\%$. No que diz respeito ao desempenho do controle PD quanto ao tempo de assentamento todos os estágios atenderam a especificação imposta de 3s. Durante o projeto de controle foi determinado que o sobressinal fosse de até 5%, em nenhum momento houve sobressinal no sistema, ou seja, neste ponto o controlador também atendeu a especificação dada ao sistema. O elo teve dificuldades de acompanhar as mudanças bruscas de forma mais precisa um ponto de referência para outro, este fato ocorreu principalmente devido as próprias limitações físicas do sistema.

4.5.2 ELO DE TRANSLAÇÃO

No projeto do controlador PD deste sistema foram utilizados os polos discretos ajustados $z_2 = 0,5130 \pm i0,2962$ e o valor do ganho proporcional K_{p2} foi de 0,5. Esse controlador proporcional agiu nos primeiros 2 segundos. Como os controladores PD projetados foram implementados e testados ao mesmo tempo nos elos de rotação e de translação então o tempo de amostragem foi o mesmo de 0,2 s e todo o teste ocorreu em 90 segundos.

As figuras (4.8) a (4.11) mostram os resultados experimentais obtidos do elo de translação do robô manipulador.

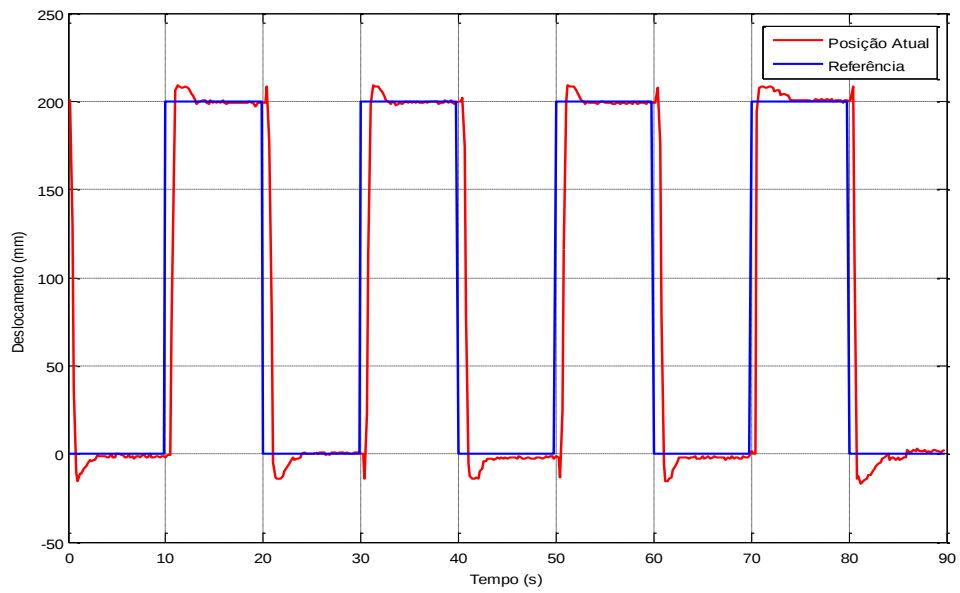


Figura 4.8 - Referência e Posição atual do Elo de Translação em malha fechada

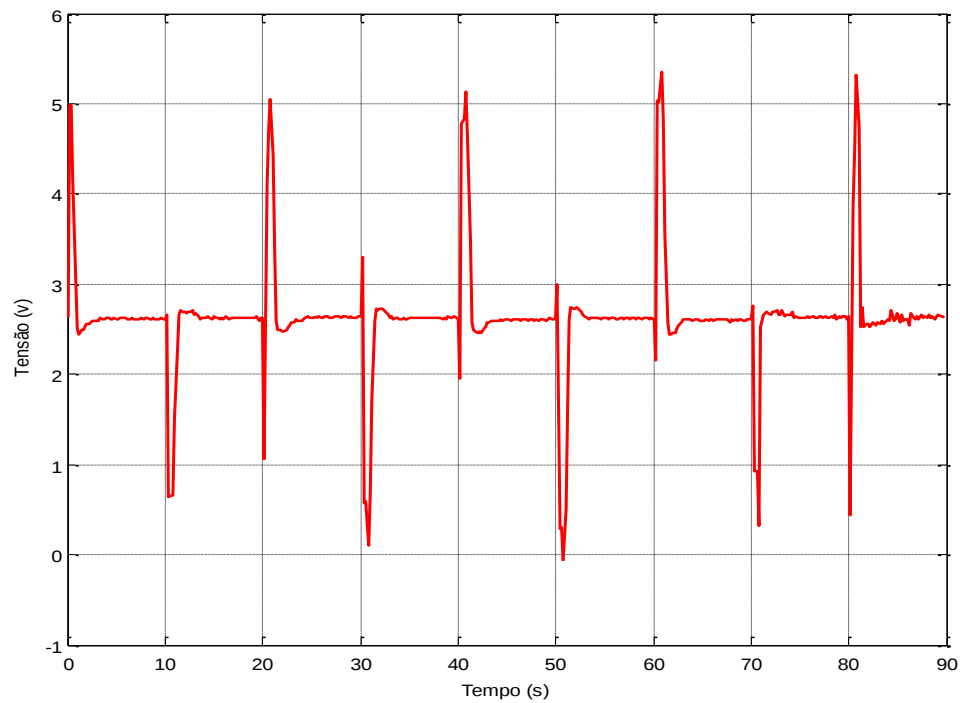


Figura 4.9 - Variável de Controle do Elo de Translação

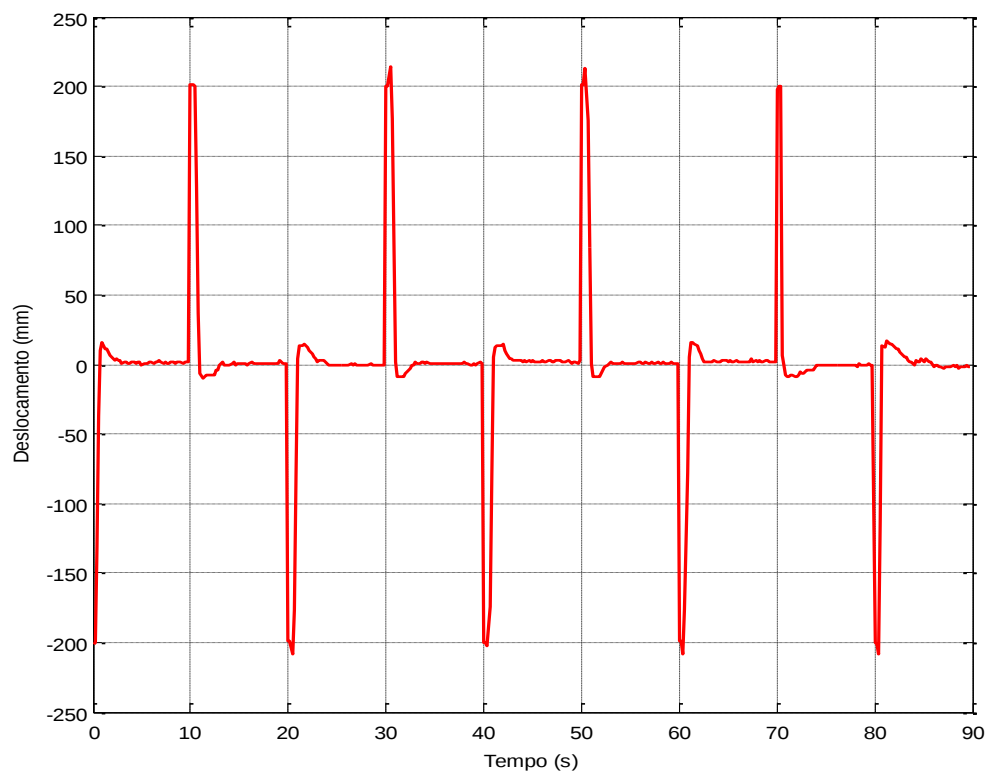


Figura 4.10 - Variável Erro de Saída do Elo de Translação

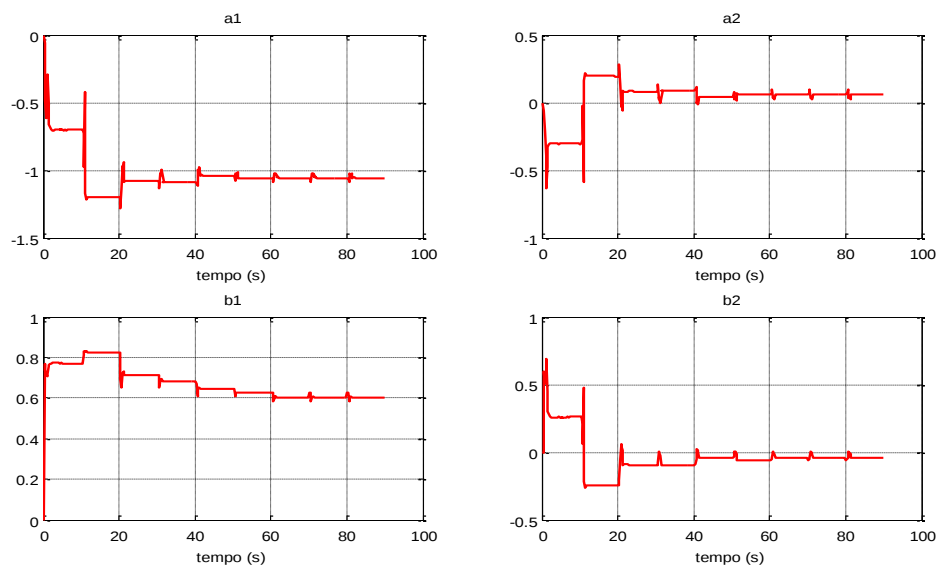


Figura 4.11 - Parâmetros estimados do elo de translação

O desempenho do controlador PD aplicado no elo de translação pode ser avaliado a partir da Tabela (4.3),

Tabela 4.3 - Desempenho do elo de Translação sob ação do Controlador PD

Estágio	Intervalo (s)	Referência (mm)	Valor Real (mm)	Sobre Sinal Máximo (%)	Tempo de Assentamento (s)	Erro em regime permanente (%)
0	0 a 10	0	-1,55	7,88	3,2	0,774
1	10 a 20	200	199,63	4,7	3	0,185
2	20 a 30	0	-0,19	7,2	3,8	0,093
3	30 a 40	200	199,41	4,45	2,6	0,293
4	40 a 50	0	-2,09	2,06	2,8	1,045
5	50 a 60	200	199,20	4,45	2,9	0,402
6	60 a 70	0	-1,66	2,82	2,6	0,829
7	70 a 80	200	199,18	4,35	4	0,412
8	80 a 90	0	-3,61	3,58	3,4	1,804

Analisando o gráfico da Figura (4.8) e a Tabela (4.3) do desempenho do controlador PD no elo de translação, pode-se concluir que o desempenho do controlador PD também foi parcialmente satisfatório, este controlador atendeu apenas uma parte de todas as especificações determinadas ao sistema. Os estágios 4, 6 e 8 obtiveram um sobressinal dentro do valor especificado que foi de 4,3%, onde o maior valor de sobressinal de 7,88% foi obtido no momento da transição do controlador proporcional para o controlador PD. O erro em regime permanente se mostrou dentro do limite em todos os estágios, onde a maioria apresentou valores próximos de zero. Quanto ao tempo de assentamento em nenhum dos casos o controlador conseguiu atingir o valor especificado de 2 s. Neste elo o controlador seguiu a trajetória determinada pela referência de forma mais eficiente.

4.6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os resultados obtidos pela implementação de controladores PD nos elo de rotação e de translação de um robô manipulador planar. Os testes experimentais mostraram que com os controladores ambos os elos seguiram as trajetórias previamente definidas. O elo de rotação de forma parcial e de forma mais satisfatória para o elo de translação, principalmente se for comparado os valores do erro de estado estacionário em ambos os casos.

De forma geral pode-se afirmar que com os controladores PD as especificações de desempenho impostas aos elos foram atendidas em boa parte de todo o experimento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo principal projetar e implementar controladores PD auto ajustáveis via alocação de polos nos elos de rotação e de translação de um robô manipulador de dois graus de liberdade planar, a fim de controlar a trajetória desses elos que foi previamente estabelecida pelo projetista, de forma que atenda as especificações impostas a esses sistemas.

Dessa forma, houve a necessidade de desenvolver um estudo para realizar a identificação do sistema para cada elo do manipulador, essa identificação se deu através do método MQR, onde por meio de uma análise dos valores dos índices de desempenho calculados do sistema SEQ , R^2 e AIC e tomando como base o trabalho desenvolvido por CARVALHO (2009), concluiu-se que o modelo que melhor representa os elos é de segunda ordem. Obtido o modelo que representa a dinâmica do sistema, a próxima etapa foi projetar um controlador PD discreto auto ajustável via alocação de polos, para isso foi desenvolvido um estudo para encontrar a variável de controle e os polos ajustados para o sistema. As especificações de desempenho para ambos os elos foram impostas e o controlador foi implementado e testado experimentalmente considerando que os elos deveriam seguir uma certa trajetória determinada atendendo essas especificações. Os resultados obtidos mostraram que ambos os elos seguiram as trajetórias escolhidas, porém não foram atendidas de forma geral todas as especificações de desempenho

impostas a eles. O controlador PD se mostrou satisfatório quanto ao controle do elo de rotação em regime permanente, já que os valores obtidos ficaram dentro da margem de $\pm 2\%$ especificada pelo projetista, da mesma forma ocorreu com o elo de translação que obteve excelentes resultados quanto ao erro em regime permanente. Porém, com o controlador PD aplicado no elo de translação não se conseguiu satisfazer em seis patamares as condições impostas quanto ao valor máximo do sobressinal e em todos os patamares quanto ao tempo de assentamento.

Todo o experimento envolvendo o cálculo dos parâmetros das plantas dos elos e as variáveis de controle ocorreram a cada período de amostragem e de forma desacoplada dinamicamente, porém todo o experimento foi realizado ao mesmo tempo para ambos os elos, utilizando o mesmo tempo de amostragem de 0,2 segundos em malha fechada. Para o desenvolvimento de todo esse estudo, se fez necessária a criação de programas em plataforma LabVIEW® com os dados coletados dos testes experimentais salvos e esses arquivos foram plotados em gráficos utilizando a plataforma Matlab®.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos a partir das considerações e resultados obtidos pelo desenvolvimento deste estudo no robô manipulador de dois graus de liberdade planar, como:

- ✓ Realizar uma nova identificação dos elos do robô manipulador utilizando um método de estimação de parâmetros diferente do MQR;
- ✓ Obter novos resultados do desempenho do controlador PD através da escolha de uma referência diferente para a trajetória a ser seguida pelos elos admitindo outras especificações de desempenho para o sistema;
- ✓ Projetar e implementar outras técnicas de controle adaptativo da família do PID como por exemplo o controlador PI (proporcional integral) e o próprio PID no robô manipulador;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ALONGE, F., D'IPPOLITO, F., RAIMONDI, F. M., 2003, "Na Adaptive Control Law for Robotic Manipulator Without Velocity Feedback", *Control Engineering Practice*, pp. 999-1005.

ASTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T., 1995, *"PID Controllers: Theory, Design, and Tuning"*, ISBN, 2ª ed., USA.

ASTRÖM, K. J., WITTENMARK, B., 1995, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, Inc.

ATIA, K., R. 2013, "A New Variable Structure Controller for Robot Manipulators with a Nonlinear PID Sliding Surface", *Robotica*, 31, pp 503-510.

BATTISTELLA, S., PIERI, E. R., STEMMER, M. R., 1999, "Controle de Posição de um Robô Manipulador SCARA utilizando Redes Neurais Artificiais com Treinamento On-line", IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.

BOBÁL, V., BÖHM, J., FESSL, J. MACHÁCEK, J., 2005, *Digital Self-Tuning Controllers*, 1ª ed., Germany: Springer-Verlang London Limited.

CARVALHO, J. S. F., 2009, "Controle Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador de Dois Graus de Liberdade Planar", Tese D. Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

CHAO, C. T., TENG, C. C., 1997, "A PD-like self-tuning fuzzy controller without steady-state error", *Fuzzy Sets and Systems* 87, pp. 141-154.

COELHO, A. A. R. e ARRUDA, L. V. R., 1988, Implementação do Controlador Auto-Ajustável com Detecção de Ruptura do Modelo, 3º Congresso Nacional de Automação Industrial, São Paulo, SP, p. 308-313.

COELHO, A. A. R., COELHO, L. S., 2004, *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, 1ª ed., Florianópolis: Ed. Universidade Federal de Santa Catarina.

CORDEIRO, E. Z., 2009, “Controle de Posição de uma Mesa de Coordenadas de Dois Graus de Liberdade”, Dissertação, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

CRAIG, J. J., 2004, *Introduction to Robots: Mechanics and Control*. 3º ed., Ed. Prentice Hall.

DORF, R. C. e BISHOP, R. H., 2001, *Sistemas de Controle Modernos*, 8º ed., Rio de Janeiro – RJ, Ed. LTC.

DUBOWSKY, S., DESFORGES, D. T., 1979, “The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators”, *J. Dynamic Syst., Means., Contr.* (ASME), v. 101, pp. 193-200, Sept.

ENGELBERGER, J. F., 1995, “Robotics in the 21th Century”, Scientific American, September.

FUJIWARA, A., KATSUMATA, K., ISHIDA, Y., 1995, “Neural Network based Adaptative I-PD Controller for Pneumatic Cylinder”, Meiji University, Higashi-mita, Tama-ku, Kawasaki, Japan.

GESSING, R., 1996, Measurements and Estimation in Adaptive Control Systems, 13th IFAC World Congress, San Francisco, USA, p. 103-108.

HANG, C. C., CHIN, D., 1991, Reduced Order Process Modeling in Self-Tuning Control, *Automatica*, v. 27, p. 529-534.

IFR - International Federation of Robotics, 2012, Frankfurt, German.

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

ISERMANN, R., LACHMANN, K.-H., MATKO, D., 1992, *Adaptive Control Systems*. 1ª ed., Ed. Prentice Hall, Grã-Bretanha.

KLAFTER, R., CHMIELEWSKI, T., NEGIN, M., 1989, “*Robotic Engineering, na Integrated Approach*”, Prentice-Hall International Editions, London.

KUBALCIK, M. e BOLBÁL V., 2006, “Adaptive control of coupled-drive apparatus based on polynomial theory”, in *IEEE International Conference on Control Applications*, Glasgow, Scotland, pp. 594-599.

KURZ, H., ISERMANN, R., SCHUMANN, R., 1980, “Experimental Comparison and Application of Various Parameter-Adaptive Control Algorithms”, *Automatica*, Vol. 16, pp. 117–133.

KAWAMURA, K., GORDON, S. M., RATANASWARD, P. S., 2007, Robotic Body-Mind Integration: Next Grand Challenge in Robotics, em CUBERO, S. (Org.). *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, Croacia, ISBN.

LIU, M., 1997, “Decentralized PD and Robust Nonlinear Control for Robot Manipulators”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 319-332.

LIJUNG, L., 1996, *Development of System Identification*, 13th IFAC World Congress, San Francisco, USA, p. 141-146.

LIJUNG, L., 1999, *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

LIJUNG, L., SÖDERSTRÖM, T., 1983, *theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press.

LUNA, M. L. G., 2008, “Análise de Robustez no Acompanhamento de Trajetória de Um Robô Manipulador Planar de Dois Graus de Liberdade com Controle H_∞ ”, Tese D.Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

MALIK, O. P., HOPE, G. S., CHENG, S. J., 1991, Some Issues on the Practical Use of Recursive Least Squares Identification in Self-Tuning Control, *Int. Journal Control*, v. 53, n. 5, pp. 1021-1033.

MARTINS, N. A., 2001, “Técnicas de Controle Adaptativo Direto para Robôs Manipuladores no Espaço de Tarefa: um Estudo Comparativo”, Universidade estadual de Maringá, Maringá, MG, Brasil.

MEIRA, A. S., 2010, “Controle Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador Eletropneumático de Três Graus de Liberdade Cartesiano”, Dissertação, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

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.

NOF, S. Y., Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons, 1985.

NISE, N. S., 2002, *Engenharia de Sistemas de Controle*, 3^o ed., Rio de Janeiro – RJ, Ed. LTC.

OGATA, K., 2010, *Engenharia de Controle Moderno*, 5^o ed., São Paulo – SP, Ed. Pearson.

PINTO, C., R., A., 2011, “Controle Adaptativo Aplicado em Dois Elos de um Robô Manipulador Eletromecânico de Cinco Graus de Liberdade”, Tese D. Sc., UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

QUILES, E., MORANT, F., GARCIA, E., BLASCO, R., CORRECHER, A., 2002, “Control Adaptativo de um Sistema de Control Neumático”, In: *Conferência Iberoamericana em Sistemas Cibernética e Informática*, Orlando, USA.

RIUL, J. A., VALE, F. A., MONTENEGRO, P. H. M., 2010, “Controlador Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador Eletropneumático de Três GDL Cartesiano”, Nono Simpósio de Mecânica Computacional, São João Del-Rei, MG, Brasil

ROMANO, V. R., 2002, *Robótica Industrial*. 1^a ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher LTDA.

SANTIBAÑEZ, V., KELLY, R., 2001, “PD control with feedforward compensation for robot manipulators: analysis and experimentation”, *Robotica*, Vol. 9, pp. 11-19.

SCHEINMAN, V., 1998, “Ideas on Impleting Modular Robot Systems”, Technical Paper of Advanced Cybernetics Group, Inc.

SICILIANO, B., VILLANI, L., 1996, “Adaptive Compliant Control of Robot Manipulators”, *Control Eng. Practice*, Vol.4, No. 5, pp. 705-712.

SLOTINE, J. J., LI, W., 1987, “On the Adaptive Control of Robot Manipulators”, *Int. Journal of Robotic Research*, pp. 49-59.

SMITH, M. H., ANNASWAMY, A. M., SLOCUM, A. H., 1995, “Adaptive Control Strategies for a Precision Machine Tool Axis”, *Precision Engineering*, pp. 192-206.

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.

TAGHIZADEH, M., NAJAFI, F., GHAFARI, A., 2010, “Multimodel PD-control of pneumatic actuator under variable loads”, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 655-662.

TAO, G., 1992, “On Robust Adaptive Control of Robot Manipulators”, *Automatica*, Vol. 28, No. 4, pp. 803-807.

TURNER, H., E., Jr., E., SHANABERGER, J., L., 1985, “Manipulator Robot”, Nordson Corporation, Amherst, Ohio.

UZMAY, I., BURKAN, R., SARIKAYA, H., 2004, “Application of Robust and Adaptive Control Techniques to Cooperative Manipulation”, *Control Engineering Practice*, pp. 139-148.

VALE, V. A. C., 2011, “Controle de Posição de um Robô Cartesiano por Meio de Técnicas Adaptativas”, Dissertação, UFPB, João Pessoa – PB, Brasil.

YAO, B., CHAN, S. P., WANG, D., 1994, “Variable Structure Adaptive Motion and Force of Robot Manipulators”, *Automatica*, Vol. 30, No. 9, pp. 1473-1477.

APÊNDICE A

A.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo aborda a metodologia matemática da técnica de controle PD via alocação de polos, tendo como principal objetivo o entendimento dessa técnica e a dedução da variável de controle que será implementada no projeto do controlador Proporcional Derivativo.

A.2 PROJETO VIA ALOCAÇÃO DE POLOS DE UM CONTROLADOR PD DISCRETO

Segundo NISE (2000), um sistema em malha fechada tem boa parte da sua dinâmica explicada pelas raízes de sua equação característica, *i.e.*, os polos do sistema em malha fechada. Através do método por alocação de polos projeta-se um controlador capaz de atenuar, ou anular, efeitos de polos indesejáveis, como também de alocar novos polos que possibilitem o comportamento desejado para o sistema em malha fechada (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995).

O método de alocação de polos requer um modelo completo do sistema, no caso deste estudo o sistema pode ser representado por um modelo de segunda ordem como foi visto no capítulo 3 seção 3.7, que se mostrou suficiente para simbolizar a dinâmica dominante do processo.

Como este trabalho está direcionado ao projeto do controlador Proporcional Derivativo (PD) auto ajustável via alocação de polos aplicado em um sistema digital,

portanto será desenvolvida a equação discretizada do termo PD do controlador PID para que se possam encontrar os parâmetros necessários para o cálculo da variável de controle do sistema.

A equação (A.1) mostra a representação da ação de controle do controlador proporcional derivativo no plano contínuo (OGATA, 2010),

$$PD(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (A.1)$$

Para encontrar a forma discreta da Equação (A.1) utiliza-se uma aproximação de s dada por (QUILES *et al*, 2002),

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_a} \quad (A.2)$$

onde, T_a é o tempo de amostragem.

Fazendo a substituição da equação (A.2) na equação (A.1), tem-se

$$PD(z) = K_p \cdot \left(1 + T_d \cdot \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_a} \right) \right) \quad (A.3)$$

Manipulando algebricamente a equação (A.3),

$$PD(z) = K_p \cdot \left(\frac{T_a + T_d}{T_a} \right) - K_p \cdot \left(\frac{T_d z^{-1}}{T_a} \right) \quad (A.4)$$

Substituindo os termos da equação anterior por q_0 e q_1 ,

$$q_0 = K_p \left(\frac{T_a + T_d}{T_a} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$q_1 = - \frac{KT_d}{T_a} \quad (\text{A.6})$$

Logo a equação (A.4) pode ser reescrita como,

$$PD(z) = q_0 + q_1 z^{-1} \quad (\text{A.7})$$

Reescrevendo a equação (A.7) em função de z ,

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} = \frac{q_0 z + q_1}{z} \quad (\text{A.8})$$

A equação (A.8) representa o controle proporcional derivativo na forma discretizada e a partir dela pode-se encontrar a equação a diferenças que descreve o comportamento da variável de controle do sistema. Aplicando a transformada Z inversa na equação (A.8) obtém-se a equação a diferenças (A.9) do controlador Proporcional Derivativo.

$$u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) \quad (\text{A.9})$$

cujos parâmetros q_0 e q_1 são definidos através da técnica de alocação de polos e portanto, deve-se resolver a equação característica desse sistema em malha fechada, já que o polinômio característico dessa equação representa sua dinâmica.

O sistema em estudo pode ser representado pela seguinte função de transferência geral discreta de segunda ordem,

$$G_p(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (\text{A.10})$$

A função de transferência em malha fechada do conjunto controlador-planta é dada pela combinação entre as equações (A.8) e (A.10),

$$M(z) = \frac{G_R(z) \cdot G_P(z)}{1 + G_R(z) \cdot G_P(z)} \quad (\text{A.11})$$

A equação (A.11) pode ser reescrita em termos das componentes representativas $A(z)$, $B(z)$, $P(z)$ e $Q(z)$ das equações (A.8) e (A.10),

$$M(z) = \frac{B(z) \cdot Q(z)}{A(z) \cdot P(z) + B(z) \cdot Q(z)} \quad (\text{A.12})$$

Substituindo os valores das componentes $A(z)$, $B(z)$, $P(z)$ e $Q(z)$ na equação anterior,

$$M(z) = \frac{(b_1 z + b_2) \cdot (q_0 z + q_1)}{(z^2 + a_1 z + a_2) \cdot (z) + (b_1 z + b_2) \cdot (q_0 z + q_1)} \quad (\text{A.13})$$

Resolvendo o denominador da equação (A.13) que é definido como sendo o polinômio característico do controlador-planta, em malha fechada,

$$P_D = z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + b_1 q_0 z^2 + b_1 q_1 z + b_2 q_0 z + b_2 q_1 \quad (\text{A.14})$$

$$P_D(z) = z^3 + (a_1 + b_1 q_0)z^2 + (a_2 + b_1 q_1 + b_2 q_0)z + b_2 q_1 \quad (\text{A.15})$$

Para obter as equações das variáveis q_0 e q_1 , basta comparar o polinômio característico (A.15) com a equação definida pela multiplicação de três polos com dois deles sendo polos conjugados complexos (polos discretos desejados para o sistema) e um terceiro observador resultando na equação A.16,

$$P_z(z) = (z - z_1)(z - z_2)(z - p) \quad (\text{A.16})$$

onde, $z_1 = v + jw$ e $z_2 = v - jw$.

Substituindo os valores de z_1 e z_2 na equação (A.16) e resolvendo-a, obtêm-se a equação (A.17),

$$P_D(z) = z^3 - (2v + p)z^2 + (v^2 + w^2 + 2vp)z - v^2 p - w^2 p \quad (\text{A.17})$$

Igualando os polinômios das equações (A.15) e (A.17) e comparando os termos de mesma ordem é possível extrair as equações (A.18), (A.19) e (A.20)

$$q_0 = - \frac{(a_1 + 2v + p)}{b_1} \quad (\text{A.18})$$

$$q_1 = - \frac{(v^2 + \omega^2)p}{b_2} \quad (\text{A.19})$$

$$p = \frac{b_1 b_2 (a_2 - (v^2 + \omega^2)) - b_2^2 (a_1 + 2v)}{b_1^2 (v^2 + \omega^2) + 2b_1 b_2 v + b_2^2} \quad (\text{A.20})$$

onde, q_0 e q_1 são os parâmetros do controlador PD na forma discretizada.

APÊNDICE B

PROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM LabVIEW®

B.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta todos os programas computacionais desenvolvidos na plataforma LabVIEW® ao longo deste trabalho no intuito de realizar a identificação do sistema, em tempo real, e controlar os elos de rotação e translação de forma desacoplada do robô manipulador de dois graus de liberdade planar através da implementação do projeto de controle Proporcional Derivativo Auto Ajustável via Alocação de Polos.

B.2 INTERFACE PRINCIPAL DO PROGRAMA

A Figura (B.1) mostra a interface do programa *IdeconPD* relacionado aos gráficos obtidos do elo de rotação e de translação do robô manipulador através da identificação do sistema, pela implementação do projeto de controle e os valores estimados dos parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 . Esta tela contém as variáveis de entrada necessárias para a execução do programa como a matriz inicial de covariância p que representa a equação 3.12 e o vetor de parâmetros $teta$ com todos seus componentes zerados inicialmente. Também é especificado nesta tela os valores da parte real e imaginária dos polos discretos ajustados representados por v e w , utilizados como parâmetros para o controlador PD.

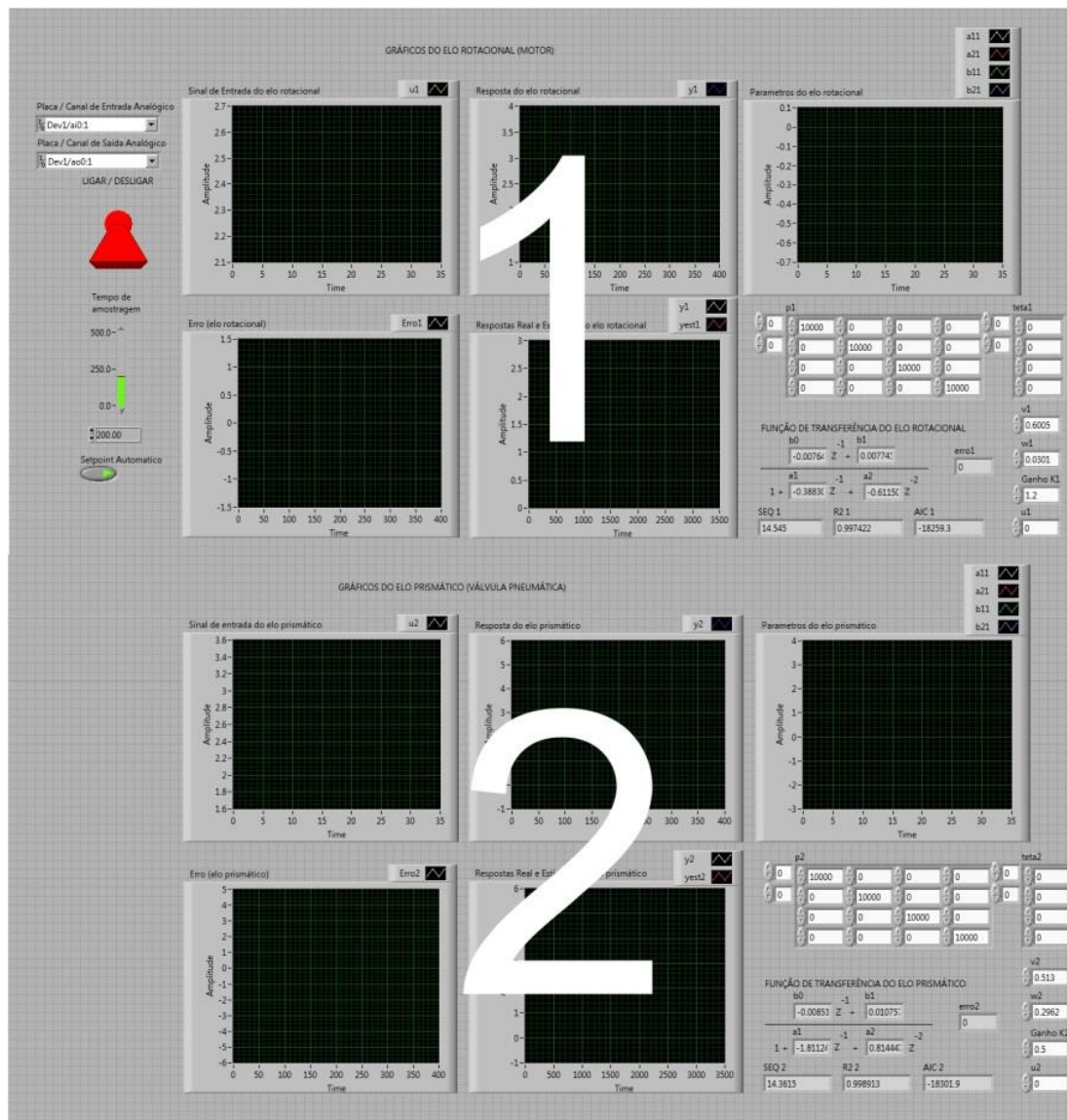


Figura B.1 - Tela principal do programa *IdeconPD*

A Figura (B.2) apresenta todas as variáveis de entrada, parâmetros estimados, gráficos e os polos discretos relacionados ao elo de rotação.

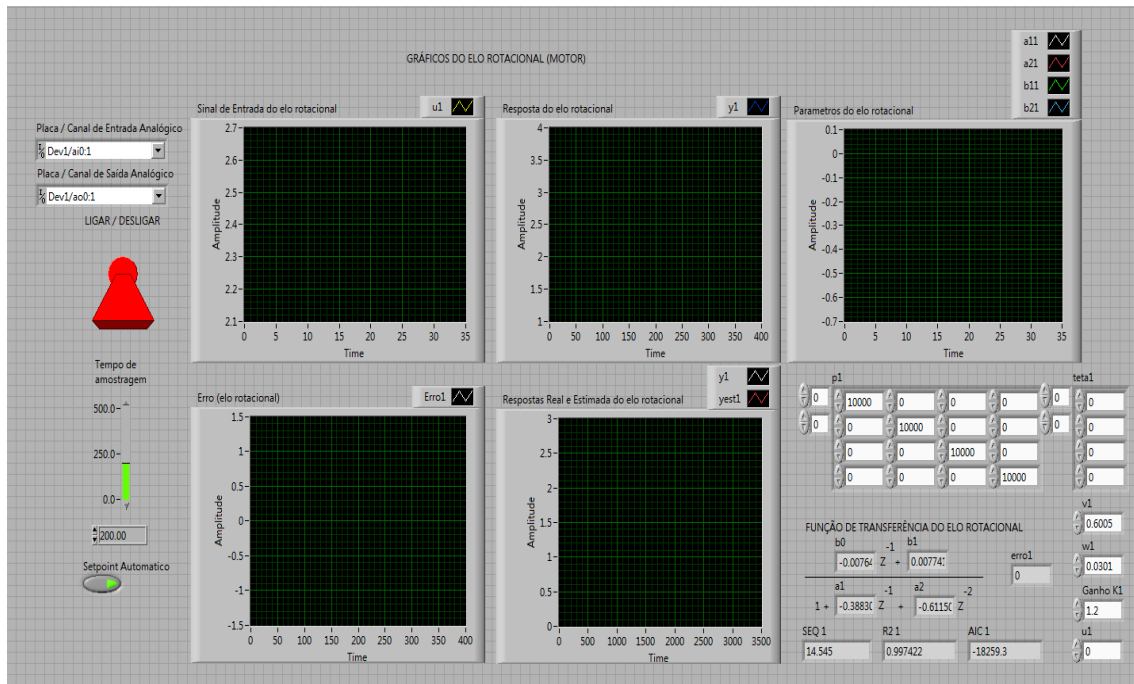


Figura B.2 - Tela principal do programa *IdeconPD* referente ao Elo de Rotação (Parte 1)

A Figura (B.3) é a parte do programa relacionada aos resultados e parâmetros de entrada do elo de translação.

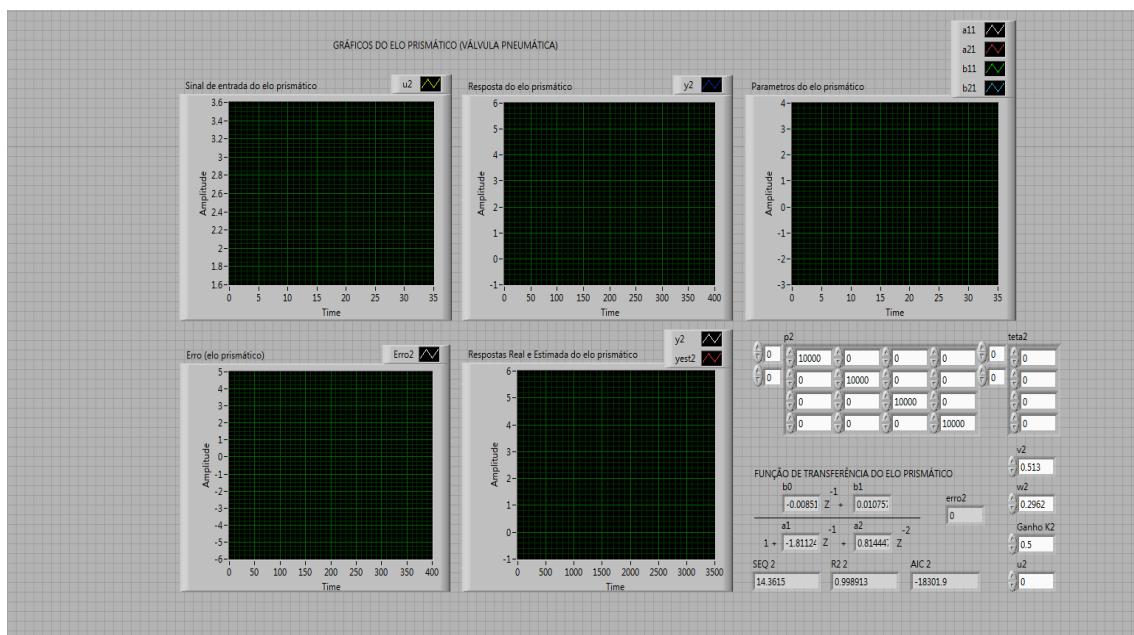


Figura B.3-Tela principal do programa *IdeconPD* referente ao Elo de Translação (Parte 2)

Toda a programação desenvolvida pode ser observada na figura (B.3), esta tela foi dividida em quatro partes para que as linhas de comando possam ser visualizadas de forma mais clara através das figuras (B.4), (B.5), (B.6) e (B.7).

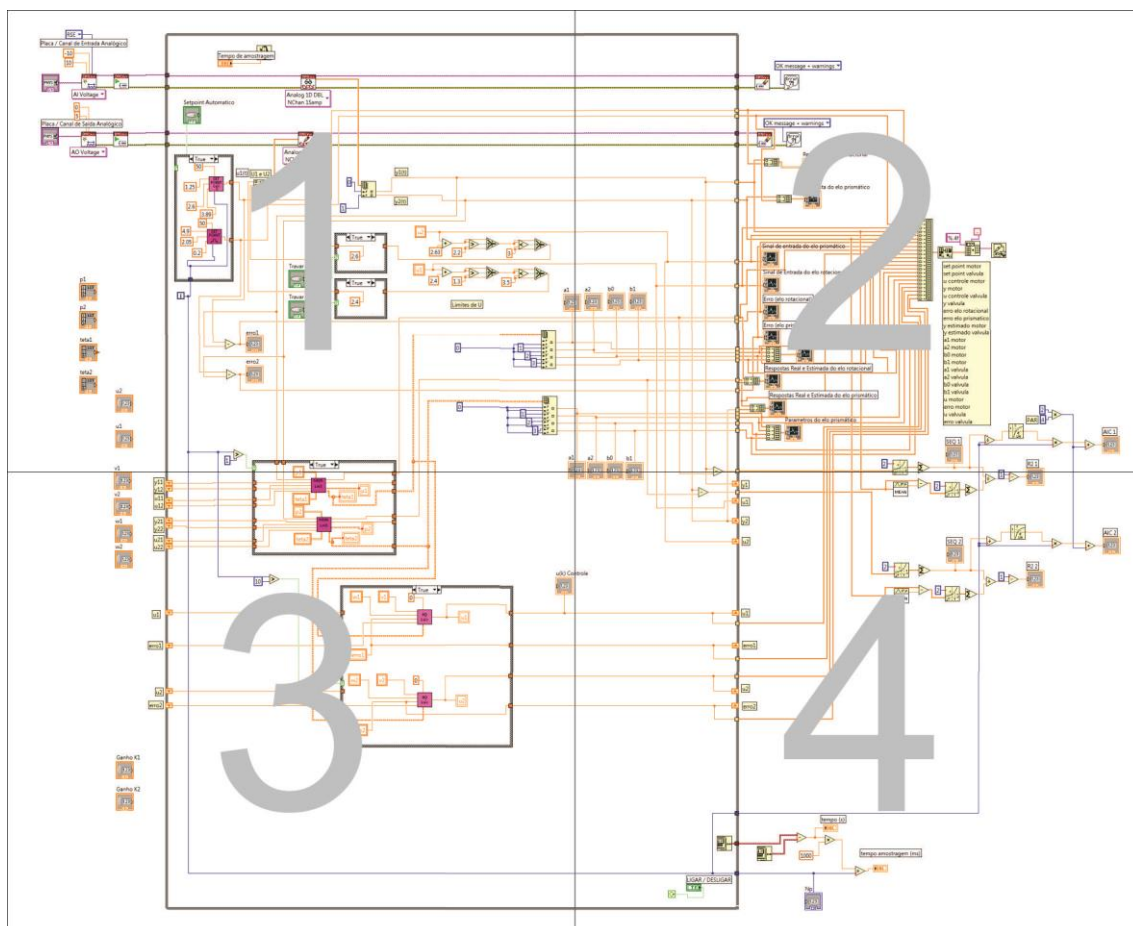


Figura B.4 - Janela principal da programação

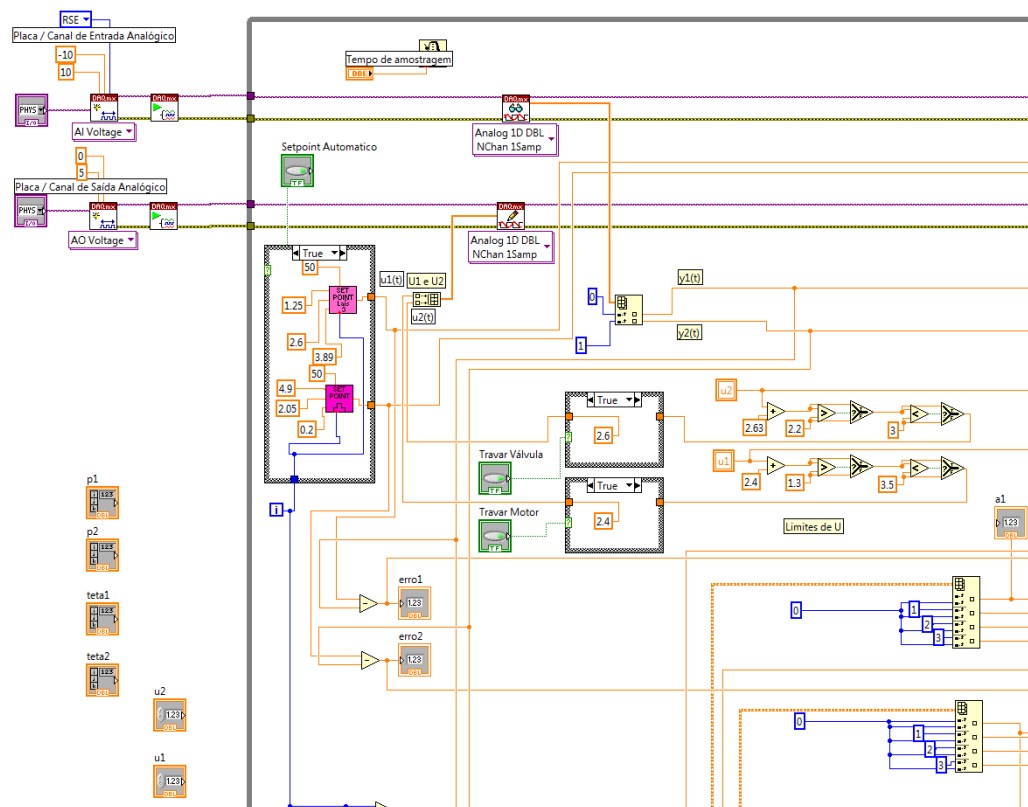


Figura B.5 - Janela principal da programação (Parte 1)

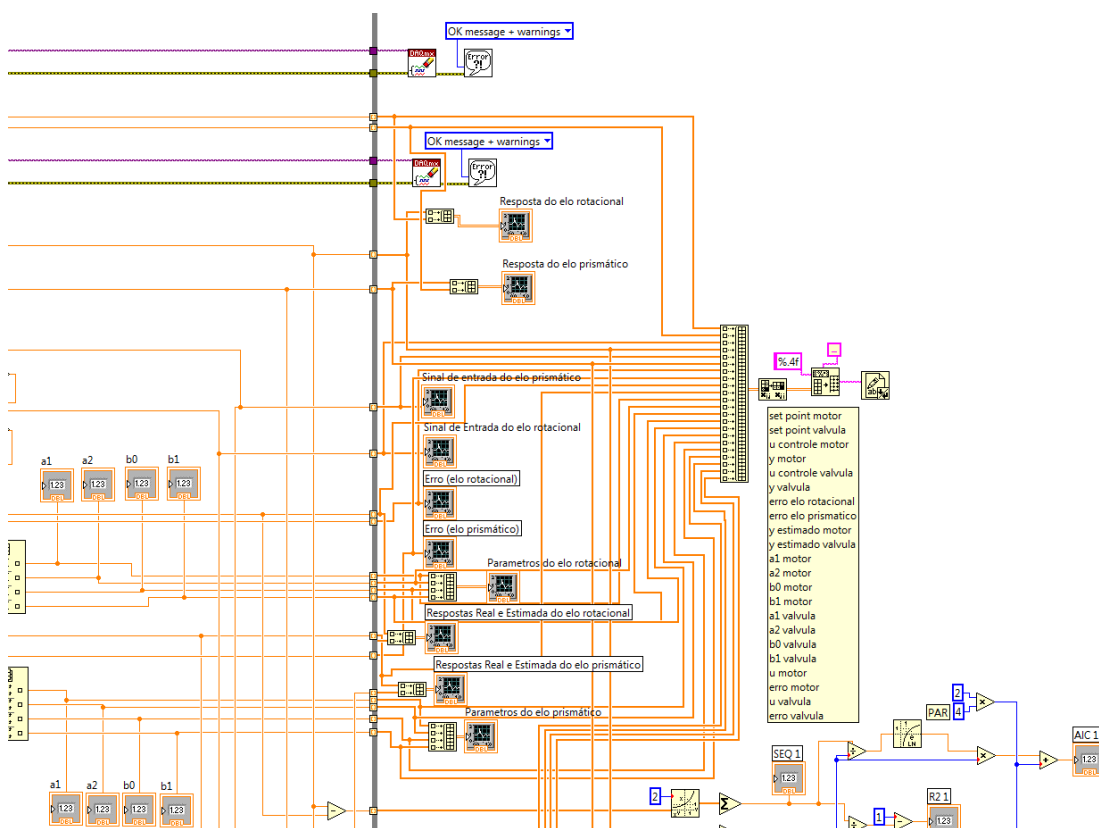


Figura B.6 - Janela principal da programação (Parte 2)

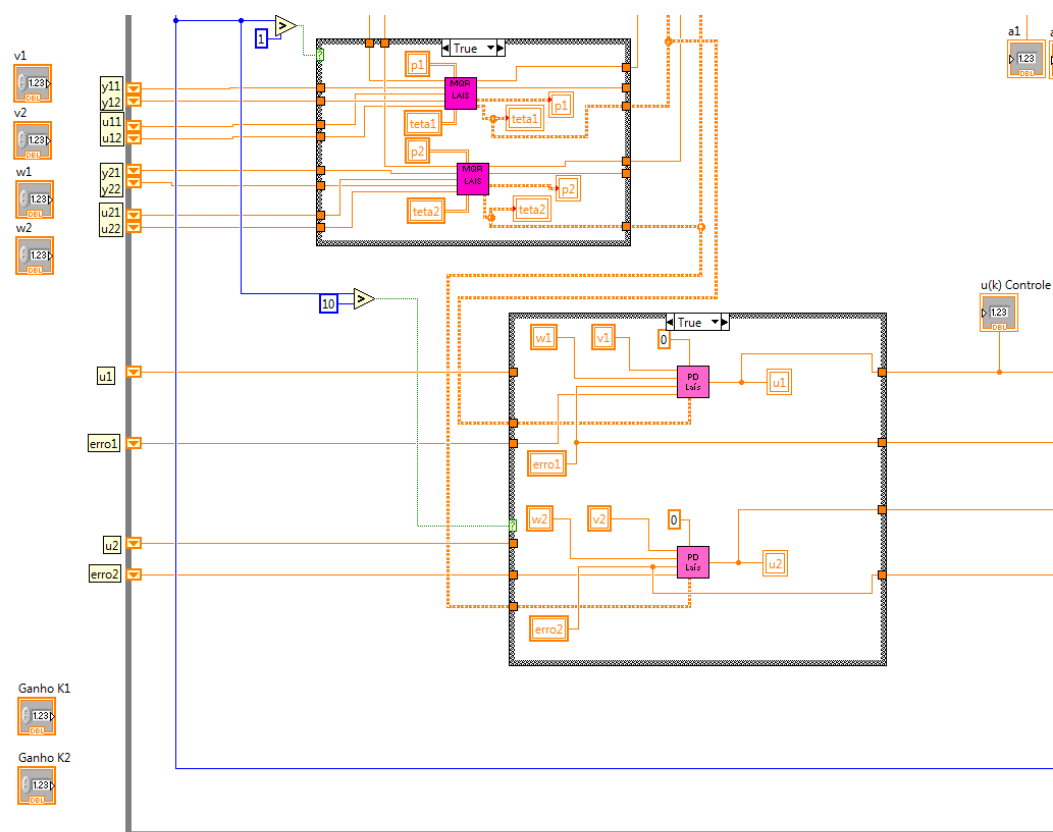


Figura B.7 - Janela principal da programação (Parte 3)

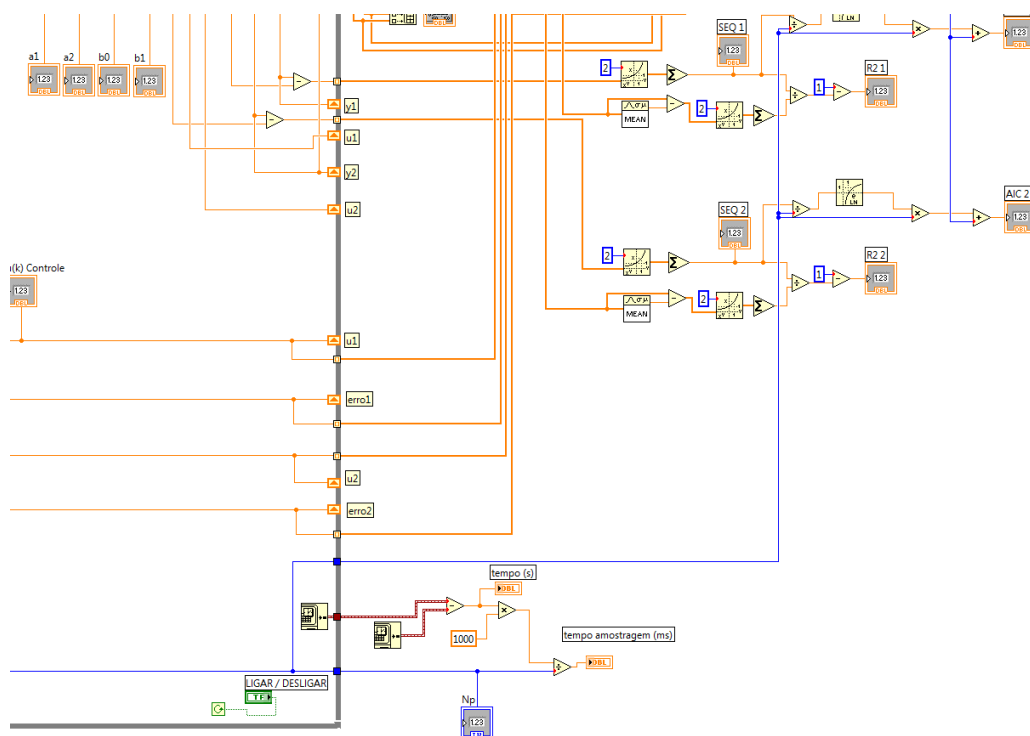


Figura B.8 - Janela principal da programação (Parte 4)

Para realizar o cálculo de algumas variáveis do sistema, foram criadas *sub-vis*, estas são subprogramas ou funções que possuem entradas e saídas definidas e tem a função de otimizar o código, podendo ser executada diversas vezes no programa principal.

As Figuras (B.9), (B.10), (B.11), (B.12), (B.13), (B.14), (B.15) ilustram as *sub-vis* desenvolvidas neste programa.

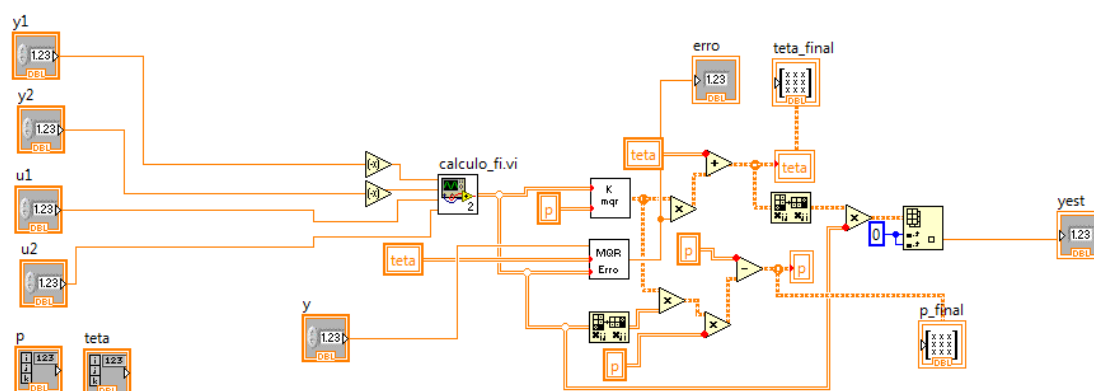


Figura B.9 - Sub-vi para o cálculo do MQR

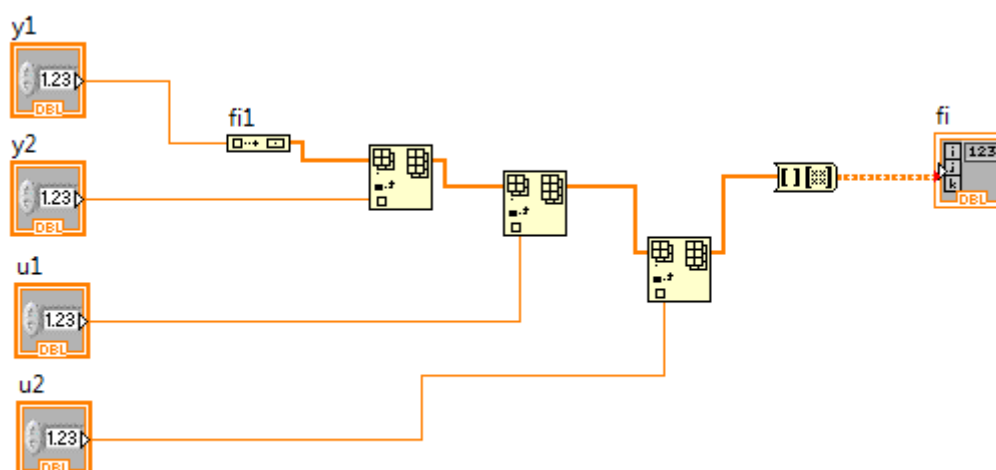


Figura B.10 - Sub-vi para o cálculo de fi

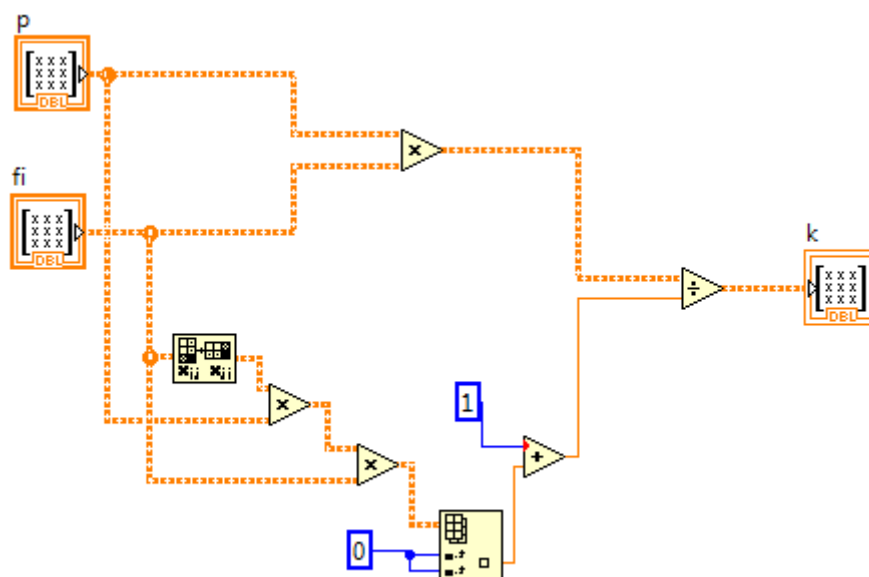


Figura B.11 - Sub-vi para o cálculo de k

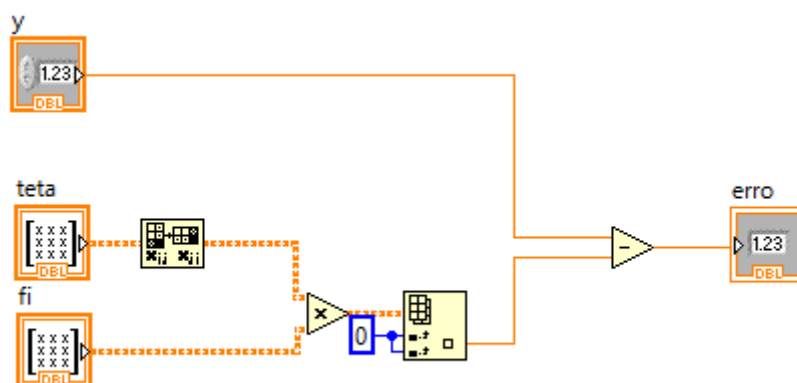


Figura B.12 - Sub-vi para o cálculo de erro

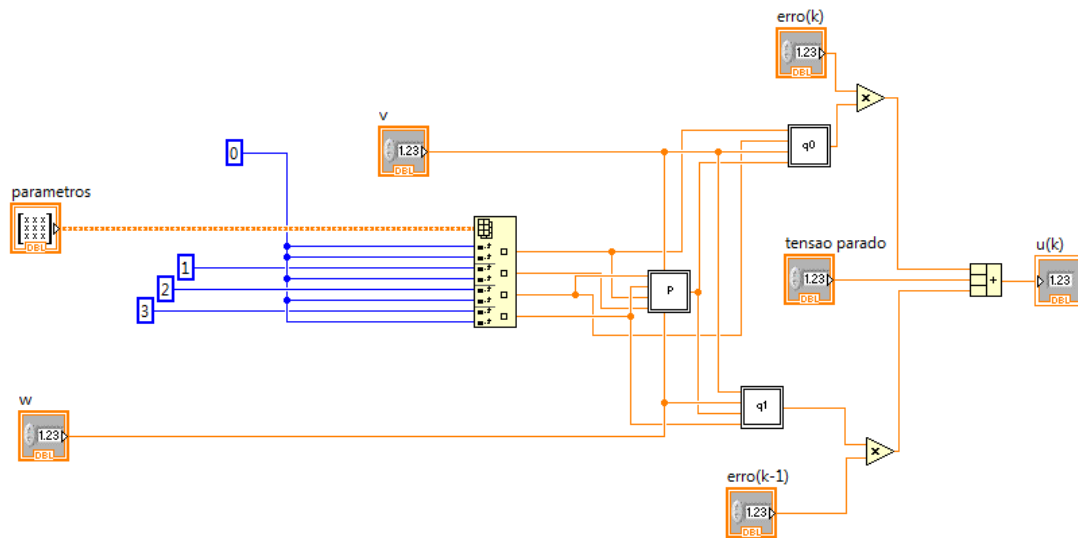


Figura B.13 - Sub-vi para o cálculo da variável de controle u

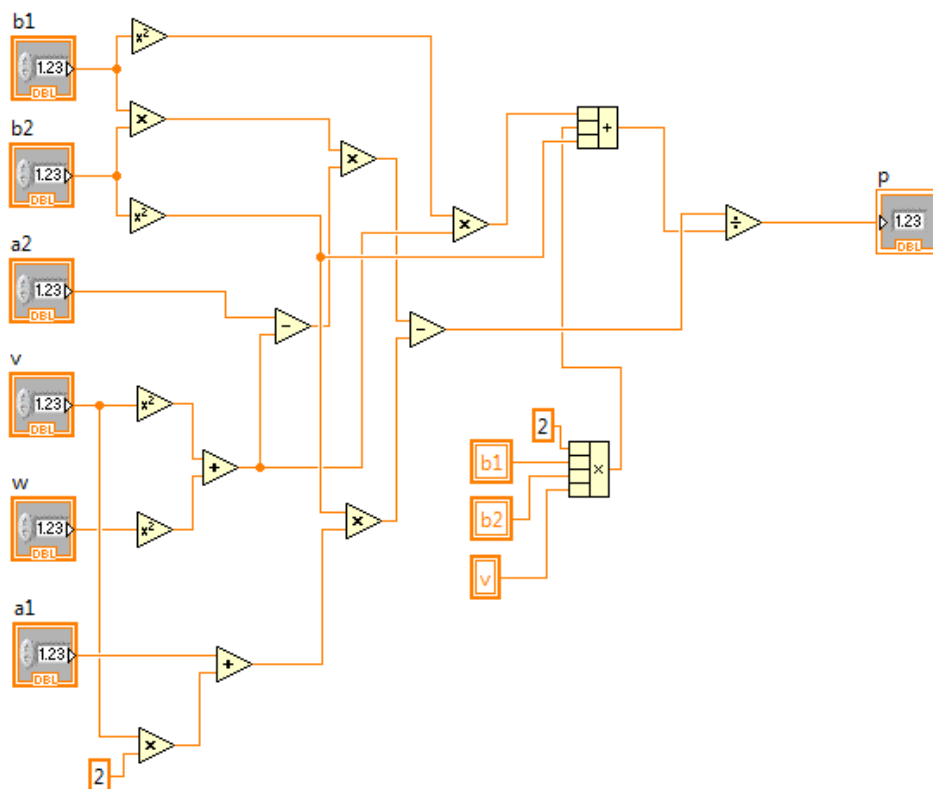


Figura B.14 - Sub-vi para o cálculo do parâmetro p do controlador PD

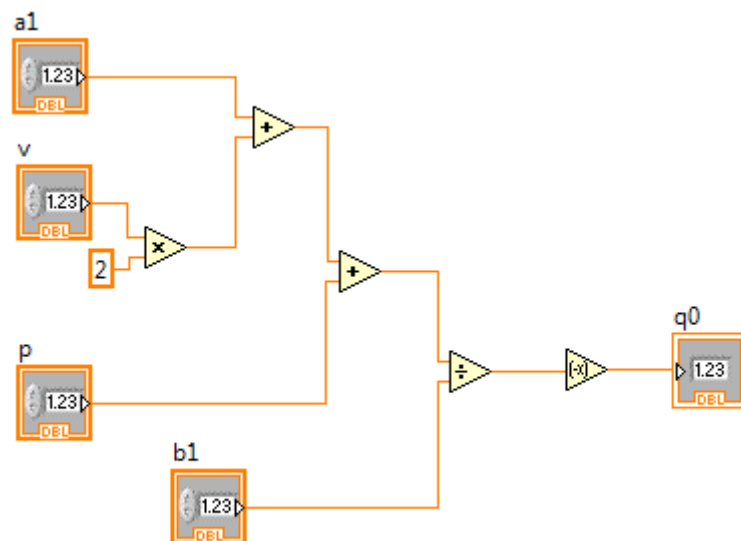


Figura B.15 - Sub-vi para o cálculo do parâmetro q_0

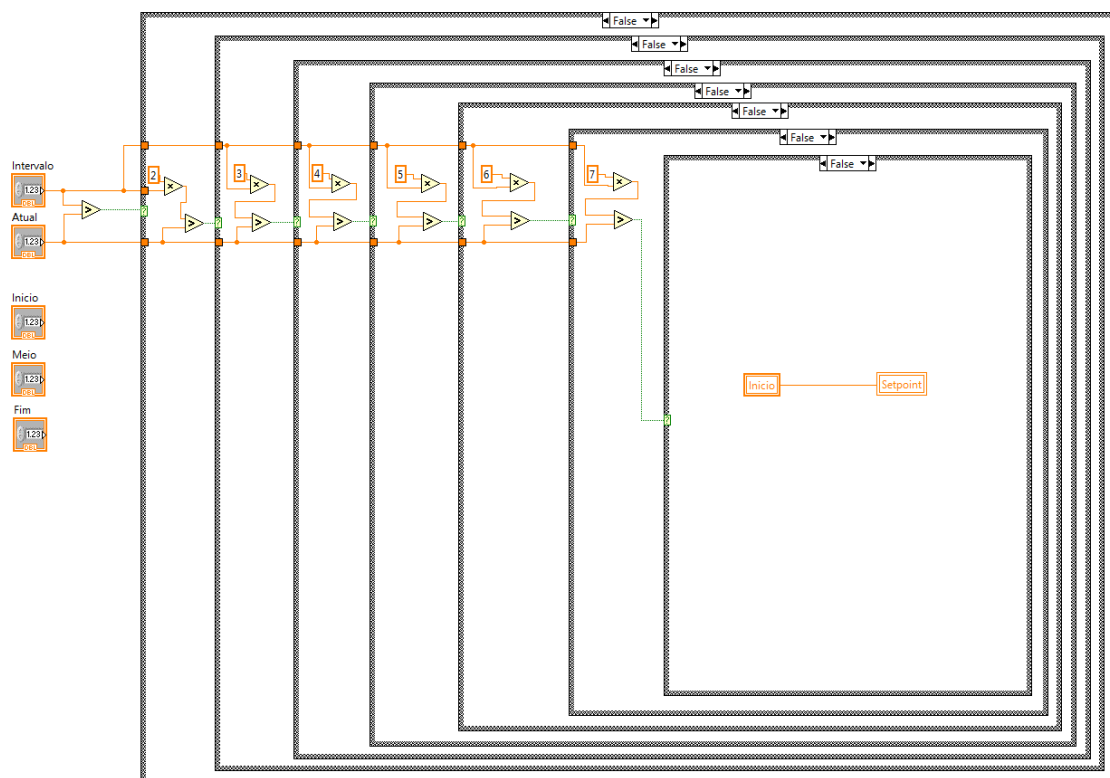


Figura B.16 - Sub-vi para o cálculo do *setpoint* do elo rotacional

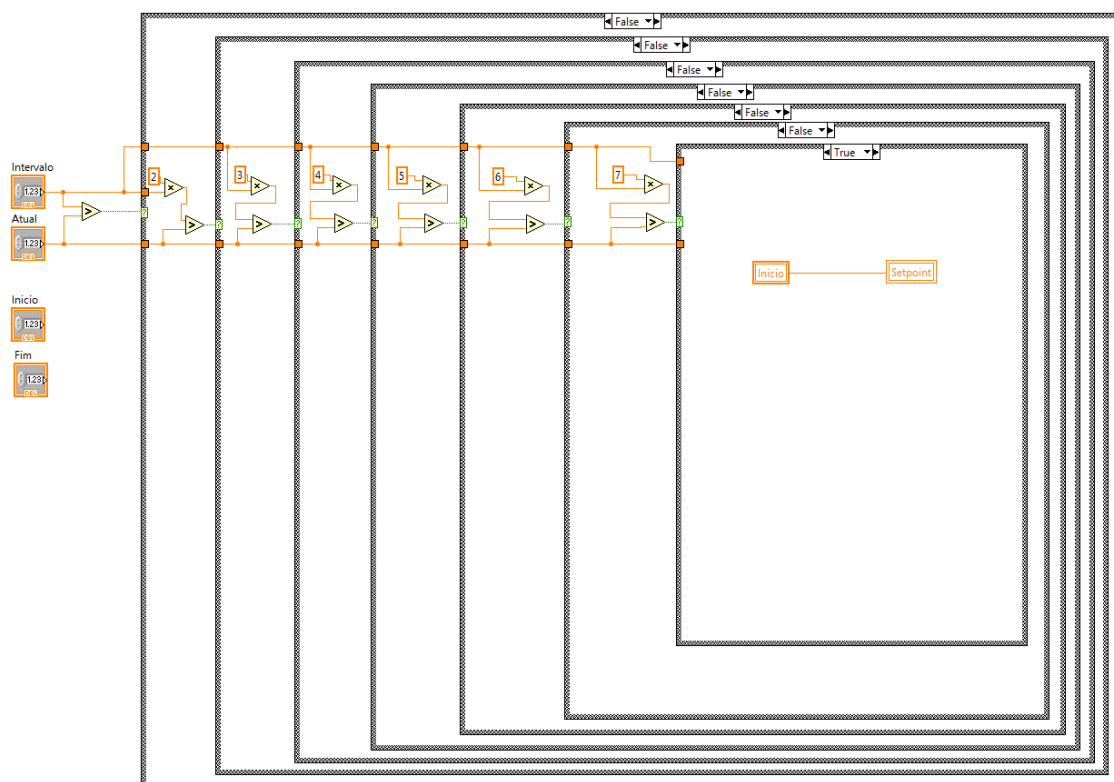


Figura B.17 - *Sub-vi* para o cálculo do *setpoint* do elo de translação