



Universidade Federal do Ceará – UFC
Departamento de Engenharia de Teleinformática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática

Phelipe Wesley de Oliveira

**ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE
MANIPULADORES ROBÓTICOS**

Fortaleza/CE

2016

Phelipe Wesley de Oliveira

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE MANIPULADORES
ROBÓTICOS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática.

Prof. Dr. George André Pereira Thé

Fortaleza/CE

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- O49e Oliveira, Phelipe Wesley de.
Estudo comparativo de técnicas de controle de manipuladores robóticos / Phelipe Wesley de Oliveira. – 2016.
95 f. : il. color. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2016.
Área de concentração: Sinais e Sistemas.
Orientação: Prof. Dr. George André Pereira Thé.
Coorientação: Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto.
1. Teleinformática. 2. Robótica. 3. Sistemas de controle inteligente. 4. Sistemas difusos. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
CAMPUS DO PICI, CAIXA POSTAL 6007 CEP 60.738-640
FORTALEZA - CEARÁ - BRASIL

PHELIPE WESLEY DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE GANHOS
VARIÁVEIS NA TAREFA DE CONTROLE DE POSIÇÃO DE
MANIPULADORES ROBÓTICOS**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Teleinformática.
Área de concentração: Sinais e Sistemas.

Aprovada em: 29/01/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. **GEORGE ANDRÉ PEREIRA THÉ** (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. **GUILHERME DE ALENCAR BARRETO**
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. **BISMARCK CLAURE TORRICO**
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. **ADRIANO ALMEIDA GONÇALVES SIQUEIRA**
Universidade de São Paulo

*Este trabalho é dedicado principalmente à minha mãe Maria,
ao meu pai Raimundo e minha irmã Laresca
pelo apoio e paciência durante os anos.*

Agradecimentos

Aos professores George Thé e Guilherme Barreto pela orientação para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais e a minha irmã pelo incentivo ao estudo.

Aos amigos do CENTAURO - Centro de Referência em Automação e Robótica (Raif, Levi e Josias) pelo apoio.

À minhas amigas Paula, Luciana, Dhébora, Ana, Ingrid, Larissa e Natália pelo apoio e paciência.

Sobretudo a Deus.

“A violência é o último refúgio do incompetente.”

Isaac Asimov - Fundação

Resumo

Robôs industriais hoje em dia são amplamente utilizados em processos industriais, sejam em processos de montagem ou processos de verificação de qualidade de produtos. A tarefa do manipulador robótico é, então, buscar posicionar a ferramenta na posição desejada com o menor erro possível, isto é feito através do uso de técnicas de controle. Apesar da existência de técnicas modernas de controle, os controladores de ganhos fixos ainda são os mais utilizados industrialmente devido a sua simplicidade. Controladores de ganhos ajustáveis normalmente necessitam de um período de treinamento do controlador ou de dados da dinâmica do sistema para o seu projeto, o que torna a substituição de controladores deste tipo algo dispendioso do ponto de vista industrial. Este trabalho apresenta uma comparação entre técnicas de controle clássicas, tal como o controle proporcional integral derivativo, e técnicas de ganhos ajustáveis de fácil implementação, ajuste por escalonamento dos ganhos e por lógica fuzzy, partindo do ponto que sejam fáceis e de rápida implementação no ramo industrial e que não seja necessário ajustar os ganhos a toda nova trajetória desejada. Os resultados mostram que o controlador ajustado por fuzzy tem uma maior capacidade de se ajustar a diferentes trajetórias sem necessidade de modificações de parâmetros quando comparado as outras técnicas, além de apresentar uma tolerância a perturbações externas e modificações na dinâmica do sistema.

Palavras-chaves: Robótica, Controle Inteligente, fuzzy

Abstract

Industrial robots today are widely used in industrial processes, whether in assembly processes or product quality verification processes. The task of the robotic manipulator is then seek to position the tool in the desired position with the smallest error as possible, this is done by using control techniques. Despite the existence of modern techniques of control, fixed earnings drivers are still the most industrially used because of its simplicity. Controller with adjustable gains typically require a training period, which makes replacement of this something expensive from the industrial point of view. This paper presents a comparison between classical control techniques, such as proportional integral derivative control, and adjustable gains techniques, set by gain scheduling and fuzzy logic, from the point of they are easy and quick implementation in the field industrial and it is not necessary to adjust the gains to all new desired trajectory. The results show that the adjusted fuzzy controller has a greater ability to adjust to different paths without modification of parameters when compared to other techniques, besides presenting a tolerance to external disturbances and changes in system dynamics.

Key-words: Robotic, Intelligent Control, fuzzy

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espaço de trabalho de alguns manipuladores industriais.	26
Figura 2 – Elos e juntas de um manipulador.	32
Figura 3 – Possíveis configurações de juntas.	33
Figura 4 – Manipulador do tipo articulado.	33
Figura 5 – Manipulador do tipo esférico.	34
Figura 6 – Manipulador do tipo cilíndrico.	34
Figura 7 – Manipulador do tipo SCARA.	35
Figura 8 – Manipulador cartesiano.	35
Figura 9 – Modelo de manipulador simulado.	37
Figura 10 – Esquema de variáveis de entrada e saída de um manipulador industrial.	43
Figura 11 – Controle de posição em malha fechada.	43
Figura 12 – Controle no espaço operacional.	44
Figura 13 – Controle no espaço das juntas.	44
Figura 14 – Diagrama de blocos de controlador PD.	46
Figura 15 – Diagrama de blocos de controlador PD com compensação da gravidade.	47
Figura 16 – Diagrama de blocos de controlador PID.	48
Figura 17 – Diagrama de bloco de modelo de escalonamento de ganhos.	49
Figura 18 – Gráficos de operações fuzzy.	52
Figura 19 – Diagrama de bloco de modelo fuzzy em ajuste de ganhos de controlador.	54
Figura 20 – Regiões de decisão GS para ganho proporcional.	58
Figura 21 – Regiões de decisão GS para ganho derivativo.	58
Figura 22 – Conjuntos fuzzy utilizados.	59
Figura 23 – Regiões de decisão fuzzy para ganho proporcional.	60
Figura 24 – Regiões de decisão fuzzy para ganho derivativo.	61
Figura 25 – Gráficos de posições PID para simulação 1.	62
Figura 26 – Gráficos de velocidades PID para simulação 1.	62
Figura 27 – Gráficos de Torques PID para simulação 1.	62
Figura 28 – Gráficos de posições PDG para simulação 1.	63
Figura 29 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 1.	63
Figura 30 – Gráficos de Torques PDG para simulação 1.	63
Figura 31 – Gráficos de posições GS para simulação 1.	64
Figura 32 – Gráficos de velocidades GS para simulação 1.	64
Figura 33 – Gráficos de Torques GS para simulação 1.	64
Figura 34 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 1.	65
Figura 35 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 1.	65
Figura 36 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 1.	65

Figura 37 – Gráficos de posições PID para simulação 2.	67
Figura 38 – Gráficos de velocidades PID para simulação 2.	67
Figura 39 – Gráficos de Torques PID para simulação 2.	67
Figura 40 – Gráficos de posições PDG para simulação 2.	68
Figura 41 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 2.	68
Figura 42 – Gráficos de Torques PDG para simulação 2.	68
Figura 43 – Gráficos de posições GS para simulação 2.	69
Figura 44 – Gráficos de velocidades GS para simulação 2.	69
Figura 45 – Gráficos de Torques GS para simulação 2.	69
Figura 46 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 2.	70
Figura 47 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 2.	70
Figura 48 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 2.	70
Figura 49 – Gráficos de posições PID para simulação 3.	72
Figura 50 – Gráficos de velocidades PID para simulação 3.	72
Figura 51 – Gráficos de Torques PID para simulação 3.	72
Figura 52 – Gráficos de posições PDG para simulação 3.	73
Figura 53 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 3.	73
Figura 54 – Gráficos de Torques PDG para simulação 3.	73
Figura 55 – Gráficos de posições GS para simulação 3.	74
Figura 56 – Gráficos de velocidades GS para simulação 3.	74
Figura 57 – Gráficos de Torques GS para simulação 3.	74
Figura 58 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 3.	75
Figura 59 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 3.	75
Figura 60 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 3.	75
Figura 61 – Gráficos de posições PID para simulação 4.	77
Figura 62 – Gráficos de velocidades PID para simulação 4.	77
Figura 63 – Gráficos de Torques PID para simulação 4.	77
Figura 64 – Gráficos de posições PDG para simulação 4.	78
Figura 65 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 4.	78
Figura 66 – Gráficos de Torques PDG para simulação 4.	78
Figura 67 – Gráficos de posições GS para simulação 4.	79
Figura 68 – Gráficos de velocidades GS para simulação 4.	79
Figura 69 – Gráficos de Torques GS para simulação 4.	79
Figura 70 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 4.	80
Figura 71 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 4.	80
Figura 72 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 4.	80
Figura 73 – Gráficos de Posições fuzzy Mandani com 5 vezes a gravidade da Terra.	82
Figura 74 – Gráficos de Velocidades fuzzy Mandani com 5 vezes a gravidade da Terra.	82
Figura 75 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 1.	83

Figura 76 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 2.	83
Figura 77 – Gráficos de perturbações.	84
Figura 78 – Gráficos de Posições com ação das perturbações.	85
Figura 79 – Gráficos de erro de posições com ação das perturbações.	85
Figura 80 – Gráficos de Velocidades com ação das perturbações.	86
Figura 81 – Gráficos de erro de velocidade com ação das perturbações.	86
Figura 82 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 1.	87
Figura 83 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 2.	87

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados do robô simulado	55
Tabela 2 – Valores utilizados no controlador PID	56
Tabela 3 – Valores utilizados no controlador PDG	57
Tabela 4 – Valores utilizados no controlador GS	57
Tabela 5 – Valores ganho integrativo controlador GS	57
Tabela 6 – Valores utilizados no conjunto de entrada do controlador fuzzy	59
Tabela 7 – Valores utilizados no conjunto de saída do controlador fuzzy para ganho K_p	59
Tabela 8 – Valores utilizados no conjunto de saída do controlador fuzzy para ganho K_v	59
Tabela 9 – Valores ganho integrativo controlador fuzzy	59
Tabela 10 – Resultados para simulação 1	61
Tabela 11 – Resultados para simulação 2	66
Tabela 12 – Resultados para simulação 3	71
Tabela 13 – Resultados para simulação 4	76
Tabela 14 – Resultados para simulação da gravidade	81
Tabela 15 – Resultados para simulação da perturbação	84

Lista de abreviaturas e siglas

IFR	International Federation of Robotics
PID	Proporcional Integral Derivativo
PD	Proporcional Derivativo
SCARA	<i>Selective Compliant Articulated Robot for Assembly</i>
NI	<i>National Instruments</i>
GS	<i>Gain Scheduling</i>
COG	<i>Center of Gravity</i>
COA	<i>Center of Area</i>
MOM	<i>Mean of Maxima</i>
SOM	<i>Smallest of Maxima</i>
EQM	Erro quadrático médio
EF	Erro final
SS	Sobressinal
TT	Torque Total
PE	Pico do erro

Lista de símbolos

q	Posição angular
\dot{q}	Velocidade angular
\mathcal{L}	Lagrangiano
\mathcal{T}	Torque da junta
\mathcal{Q}	Forças generalizadas
\mathcal{K}	Energia cinética
\mathcal{U}	Energia potencial
q_i	Posição angular da junta i
\dot{q}_i	Velocidade angular da junta i
\ddot{q}_i	Aceleração angular da junta i
\mathcal{Q}_i	Forças generalizadas da junta i
\mathcal{K}_i	Energia cinética da junta i
\mathcal{U}_i	Energia potencial da junta i
m_i	Massa da junta i
v_i	Velocidade escalar da junta i
I_i	Momento de Inércia da junta i
h_i	Altura do centro de massa da junta i
g	Aceleração da gravidade
l_i	Comprimento da junta i
l_{ci}	Distância do centro de rotação ao centro de massa da junta i
$\sin(q_i)$	Seno do ângulo de posição da junta i
$\cos(q_i)$	Cosseno do ângulo de posição da junta i
$\sin(q_i + q_j)$	Seno da soma dos ângulos de posição da junta i e da junta j

$\cos(q_i + q_j)$	Cosseno da soma dos ângulos de posição da junta i e da junta j
\mathbf{K}	Vetor energia cinética
\mathbf{U}	Vetor energia potencial
\mathbf{q}	Vetor de posições anulares
$\dot{\mathbf{q}}$	Vetor de velocidades angulares
$\ddot{\mathbf{q}}$	Vetor de acelerações angulares
$\mathbf{M}(\mathbf{q})$	Matriz de inércia
$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$	Matriz de Coriolis
$\mathbf{g}(\mathbf{q})$	Vetor de forças gravitacionais
M_{ij}	Componente da linha i coluna j da matriz \mathbf{M}
C_{ij}	Componente da linha i coluna j da matriz \mathbf{C}
g_i	Componente gravitacional da junta i
$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})$	Vetor de atrito
\mathbf{F}_v	Matriz de atrito viscoso
\mathbf{F}_c	Matriz de atrito dinâmico
$\text{sign}(x)$	Função sinal
$\mathbf{sign}(\dot{\mathbf{q}})$	Vetor de função sinal de cada junta
$\text{sat}(\mathcal{T})$	Função de saturação
e	Erro do sistema
\dot{e}	Derivada do erro do sistema
\mathbf{e}	Vetor de erros do sistema
$\dot{\mathbf{e}}$	Vetor de derivadas de erros do sistema
\mathbf{K}_p	Matriz de ganhos proporcionais
\mathbf{K}_v	Matriz de ganhos derivativos
\mathbf{K}_i	Matriz de ganhos integrativos
μ_A	Função de pertinência do conjunto fuzzy A

Sumário

1	Introdução	25
1.1	Motivação	28
1.2	Objetivos Gerais e Específicos	29
1.3	Produção Científica	29
1.4	Resumo dos Capítulos Restantes	30
2	Introdução à Dinâmica de Manipuladores	31
2.1	Manipulador Industrial	31
2.1.1	Elos	32
2.1.2	Juntas	32
2.2	A Equação do Movimento	36
3	Controle de Robôs Manipuladores	43
3.1	Controladores Convencionais	44
3.1.1	Controlador Proporcional Derivativo	45
3.1.2	Controlador PD com Compensação de Gravidade	46
3.1.3	Controlador Proporcional Integral Derivativo	47
3.2	Controladores de Ganhos Dinâmicos	47
3.2.1	Escalonamento dos ganhos	49
3.2.2	Ajuste dos ganhos com lógica fuzzy	50
3.2.2.1	Definições e Operações fuzzy	50
3.2.2.2	Variáveis Linguísticas	51
3.2.2.3	Regras	52
3.2.2.4	Inferência fuzzy	53
3.2.2.5	O ajuste de ganhos com fuzzy	53
4	Simulações e Resultados	55
4.1	Sintonia dos controladores	56
4.1.1	Controladores Clássicos	56
4.1.2	Controladores dinâmicos	57
4.1.2.1	Ajuste através de funções não lineares(GS)	57
4.1.3	Ajuste por sistema fuzzy	58
4.2	Resultados	60
4.2.1	Simulação 1	61
4.2.2	Simulação 2	66
4.2.3	Simulação 3	71
4.2.4	Simulação 4	76
4.3	Análise de desempenho fuzzy	81
4.3.1	Efeito da Gravidade	81

4.3.2	Efeito da Perturbação	82
5	Conclusões	89
5.1	Introdução	89
5.2	Resumo das Contribuições da Dissertação	90
5.3	Trabalhos Futuros	90
	Referências	91

1 Introdução

Desde o final do século XVIII, período conhecido como revolução industrial, os processos de fabricação vem sendo modificados através da inserção de máquinas com vistas à obtenção de melhoria na qualidade dos produtos finais, bem como de maior velocidade de produção. Nas últimas décadas, muito da automação de processos tem sido realizada através do uso de robôs em linhas de produção; exemplo disso são os montadores de automóveis, que utilizam robôs em diversas tarefas tais como soldagem, pintura e transporte de peças.

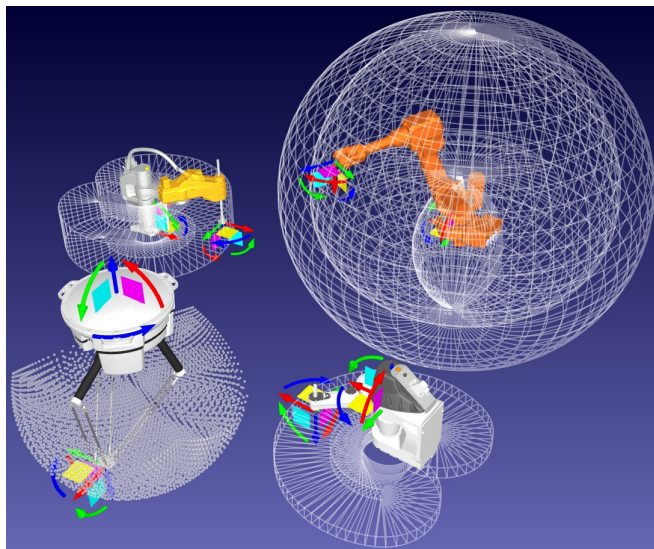
O início disso remonta ao final da década de 50, quando George Devol e Joe Engeberger desenvolveram o Unimate, o primeiro robô industrial (ROMANO, 2002). Desde então, sua difusão tem sido favorecida pelos avanços tecnológicos ocorridos como resultado do esforço de pesquisa dos grandes laboratórios e corporações. Para ilustrar com alguns números, a *International Federation of Robotics* (IFR) relata que a venda de robôs no mundo no ano de 2014 teve um aumento de 29%, chegando a ter mais de 229 mil unidades vendidas, boa parte disso para suprir as necessidades da indústria automobilística e eletrônica. Na contramão desta tendência, os dados mostram que, no ano de 2014, o Brasil teve uma redução na quantidade de robôs adquiridos, porém ainda manteve-se na liderança da aquisição de robôs industriais no continente sul-americano. Estima-se que, entre os anos de 2015 e 2018, cerca de 1,3 milhão de novos robôs industriais sejam instalados em fábricas ao redor do mundo (IFR, 2015 (Acessado em 05/10/2015)). Estes dados mostram que o setor de robótica mostra-se bem promissor, o que justifica e explica a constante realização de estudos na área.

Um robô industrial é uma máquina na qual o mecanismo geralmente consiste de uma série de segmentos articulados, ou deslizantes um em relação ao outro com o objetivo de agarrar e/ou mover objetos ou ferramentas, controlado automaticamente, reprogramável, capaz de se adaptar a diferentes aplicações; pode ser fixo ou móvel, e é usado para aplicação em automação industrial (ISO, 2012). Cada segmento do manipulador é chamado de elo e estes são conectados através de juntas, as quais fornecem o movimento relativo entre os elos. No fim da cadeia de segmentos articulados normalmente é fixado um efetuador, o qual será o responsável por executar o trabalho designado para o robô. Em boa essência, os efetuadores podem ser classificados em dois tipos: as garras, destinados a pegar e segurar objetos; e as ferramentas, que são utilizadas para operar sobre peças, aumentando o valor agregado delas. Estes efetuadores podem ser substituídos de acordo com a tarefa a ser desempenhada; por exemplo, em uma operação de soldagem normalmente será utilizado uma ferramenta para geração de arco elétrico (classe ferramenta), enquanto que, em operações de posicionamento, serão usadas pinças ou ventosas (classe garra)

e, em operações de pinturas, serão utilizadas bicos de pintura por pulverização (classe ferramenta).

Um outro conceito importante é o de espaço de trabalho que é definido como a região que o robô pode alcançar através da movimentação proporcionada pelas juntas, mostrado na figura 1. É dentro deste espaço que o manipulador deverá realizar as trajetórias necessárias para a realização da atividade requerida. Para que o manipulador seja capaz de realizar as trajetórias desejadas, faz-se necessário o conhecimento das relações entre os atuadores presentes nas juntas e posição resultante do efetuador no seu espaço de trabalho.

Figura 1 – Espaço de trabalho de alguns manipuladores industriais.



Fonte: Extraído de [RoboDK \(2015\)](#)

Do ponto de vista cinemático, o movimento do efetuador em um manipulador industrial é o resultado do movimento realizado pelos atuadores das juntas. O monitoramento do movimento do efetuador é realizado nas juntas e, por isso, é comum que os elos e as transmissões mecânicas dos seus atuadores sejam construídos de forma a serem bastante rígidos, fazendo assim com que os erros de flexibilidade introduzidos por estes elementos sejam minimizados.

Contudo, a possível existência de folgas nas juntas, e o fato da posição de cada junta afetar na dinâmica das outras (acoplamento dinâmico), faz com que os parâmetros de manipuladores sejam incertos e variem ao longo do tempo. Além disso, ainda existe a dinâmica do sistema de transmissão, dos atuadores e equipamentos eletrônicos de comando. Estes elementos incorporam ao modelo novas inércias e atritos, aumentando ainda mais a complexidade do sistema. Desta forma se pode dizer que a tarefa de controle é invariavelmente uma tarefa dinâmica multivariável, o que faz com que a solução das equações da dinâmica necessite da realização de uma elevada quantidade de cálculos, e isto requer um esforço computacional.

Muitas estratégias de controle são empregadas na tentativa de solucionar os problemas de controle de movimento de robôs manipuladores. A literatura apresenta as mais variadas técnicas. Dentre elas tem-se os controladores clássicos como o Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (WU, 2015; SU; MÜLLER; ZHENG, 2010; XU; QIAO, 2013), Proporcional-Derivativo (PD) (OSTALCZYK et al., 2013; KELLY, 1998), feedforward e PD+feedforward (KELLY; SALGADO, 1994; SANTIBAÑEZ; KELLY, 2001; AN; ATKE-SON; HOLLERBACH, 1986), as técnicas de controle avançado como adaptativo e robusto e técnicas usadas para trabalhar com sistemas não lineares, tais como controle não linear e Gain Scheduled (HUANG; YANG; YE, 2014; DEY; MUDI; SIMHACHALAM, 2014; KELLY; CARELLI, 1996; YU; CHEN; WOO, 2002), Redes Neurais Artificiais (LE et al., 2013; RAFIEI et al., 2002; PASSARO; SILVA; LIMA, 2014; ZHU; WANG, 2011; PATAN, 2015; APKARIAN; ADAMS, 1998) e Lógica fuzzy (LLAMA; KELLY; SANTIBAÑEZ, 2001; MISIR; MALKI; CHEN, 1996; HO; WONG; RAD, 2007; SONG et al., 2005; MEZA et al., 2012; TSAI; WANG; LIN, 2000; PURWAR; KAR; JHA, 2004; LI et al., 2014; LI; TONG, 2014; TONG; HUO; LI, 2014).

Apesar da ampla variedade de técnicas apresentadas, as técnicas convencionais de controle ainda têm sido empregadas na maioria dos processos automatizados no segmento industrial nos últimos 50 anos. Estima-se que mais de 90% das malhas existentes sejam do tipo PI ou PID, atingindo uma larga faixa de aplicações, o que é justificado pela sua simplicidade (CARVALHO, 2009).

O grande problema das técnicas clássicas de controle está no fato de a grande maioria das plantas sofrer variações em seus parâmetros ao longo do tempo ou apresentar não-linearidades, tornando-se necessário reajustar os ganhos dos controladores. Este procedimento, contudo, não é desejado do ponto de vista industrial, pois é dispendioso, demorado e muitas vezes requer a descontinuidade do processo em questão.

Do exposto, apesar do amplo uso, os controladores clássicos, como o PID de ganhos fixos, não apresentam um desempenho adequado em vários tipos de aplicações. Na literatura há relatos de que os controladores PID instalados que operam com ganho fixo não apresentam um desempenho satisfatório frente a sistemas não lineares que possuem parâmetros variando com o tempo (ARRUDA et al., 2008; OVIEDO; BOELEN; OVERSCHEE, 2006). Isto mostra que técnicas de controle moderno tem uma grande importância, já que conseguem trabalhar com as não linearidades de uma forma bem mais satisfatória quando comparadas as técnicas clássicas. Isto pode ser observado nos trabalhos de Le et al. (2013) onde foram utilizadas redes neurais para modificação dos ganhos, nos trabalhos de Dey, Mudi e Simhachalam (2014) onde são utilizadas funções não lineares para realizar a modificação dos ganhos e nos trabalhos de Ho, Wong e Rad (2007) e Meza et al. (2012) onde os ganhos eram modificados através de lógica fuzzy, além destes existem uma série de outros trabalhos mais antigos como os de Ge, Wang e

Tan (2001), Favier e Hassani (1982), Dubowsky e DesForges (1979), Carelli, Camacho e Patino (1995), Clarke e Gawthrop (1979), Clarke e Gawthrop (1975), Craig, Hsu e Sastry (1987) e nos de Kelly e Carelli (1996). Todos esses trabalhos comparam as técnicas clássicas de controle com as técnicas de ganhos variáveis e mostram o melhor desempenho destes controladores em comparação aos clássicos.

1.1 Motivação

As técnicas de controle de ganhos fixos continuam amplamente utilizadas na indústria mesmo em operações onde o seu uso não obtém os melhores resultados. As placas de controle de posição voltadas para robótica disponíveis comercialmente¹ já possuem o controlador PID implementado e os ganhos podem ser modificados diretamente na placa, o que faz com que possam ser utilizadas em diferentes aplicações somente com a modificação dos ganhos. Mas, se existem técnicas melhores para sistemas não lineares, então por que não implementá-las em placas comerciais da mesma forma?

Muitas das técnicas de controle modernas seriam mais complicadas pois necessitam de etapas de treinamento e teste para cada sistema, como é o caso do uso de redes neurais. Do ponto de vista da elaboração de um produto comercial, não seria fácil atender esse requisito, pois, diferentemente dos modelos onde só é necessário modificar os ganhos, essas necessitariam muito mais do que isso. Porém, existem técnicas que não necessitam de etapas de treinamento e, assim como o controle PID clássico, podem ter somente alguns parâmetros ajustados.

Um exemplo dessas técnicas seriam os controladores não lineares e controladores fuzzy que trabalham realizando a modificação dos ganhos em tempo real. Isto posto, algumas questões surgem naturalmente, a saber: *(i)* qual destes controladores apresenta melhor desempenho em diferentes situações de operação? *(ii)* Qual o mais simples de implementar em um sistema de forma que possa ser distribuído como um produto a ser utilizado em diferentes aplicações de controle em robótica? *(iii)* Quais são capazes de lidar adequadamente com não linearidades e perturbações que possam surgir no sistema controlado?

Comparar, por meio de simulações, algumas técnicas de controle de ganhos variáveis que atendam ao requisito de implementação em uma placa de controle industrial comercial (tais como baixo custo computacional, simplicidade do algoritmo e fácil utilização do controlador) com desempenho satisfatório é uma das motivações deste trabalho. Mais especificamente, as técnicas comparadas serão os controladores não lineares que agem na modificação dinâmica dos ganhos através do uso de funções e parâmetros ou através da

¹ Como exemplo tem-se os modelos 7340, 7344 e 7334 da National Instruments. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/3809>

lógica fuzzy. As técnicas que utilizam redes neurais ou qualquer outra que necessite de uma etapa de treinamento, não serão abordadas pelos motivos já citados anteriormente. Além de uma comparação das técnicas entre si é realizada também uma comparação com as técnicas de ganhos fixos.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

Em virtude do exposto na seção anterior, o objetivo principal desta dissertação é promover um estudo comparativo de desempenho entre técnicas de controle de ganhos variáveis aplicadas ao problema de controle de posição de manipuladores robóticos.

Quanto aos objetivos específicos desta dissertação, pode-se listar os seguintes itens:

- Desenvolver um programa para a simulação de modelos dinâmicos de manipuladores em linguagem Julia² onde possam ser inseridas perturbações e diferentes tipos de controladores;
- Realizar revisão bibliográfica sobre o tema em estudo;
- Comparar o desempenho dos controladores na tarefa de controle de posição e trajetória com base nos erros quadráticos médios gerados no espaço das juntas dos robôs manipuladores;
- Estudar a capacidade dos controladores manterem o desempenho na tarefa de controle de posição e trajetória em regiões de operação para as quais não foram projetados;
- Estudar o desempenho do controlador fuzzy considerando perturbações ou variações do modelo dinâmico;
- Discutir quais das técnicas utilizadas nesta dissertação tem maior potencial para ser utilizada em um sistema embarcado comercial;
- Apresentar as conclusões do trabalho proposto.

1.3 Produção Científica

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação foram aceitos em congressos os seguintes artigos:

1. **Oliveira, P. W.** & Thé, G. A. P & Barreto, G. A. (2015). “Análise de desempenho de técnicas de controle de ganhos variáveis na tarefa de controle de posição

² Mais detalhes em <http://julialang.org>

de manipuladores robóticos”, aceito no *12nd Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional* (CBIC 2015).

2. **Oliveira, P. W.** & Thé, G. A. P & Barreto, G. A. (2015). “ Estudo Comparativo de desempenho entre técnicas não lineares no controle de manipuladores robóticos”, aceito no *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente* (SBAI 2015).

1.4 Resumo dos Capítulos Restantes

O restante deste documento está organizado segundo a lista de capítulos apresentada abaixo:

- **Capítulo 2** - Este capítulo descreve os fundamentos que compõem a dinâmica dos manipuladores industriais. Serão apresentados as partes integrantes de um manipulador industrial bem como apresentado as configurações mais comuns destes manipuladores. Além do mais será apresentada a equação da dinâmica de um manipulador e será mostrado como é possível obtê-la através do método de Euler-Lagrange juntamente com uma pequena descrição da modelagem de efeitos de atrito e de saturadores para uso na equação da dinâmica.
- **Capítulo 3** - Neste capítulo será discutida a função dos controladores em manipuladores robóticos. Serão discutidos os modelos de controladores que serão utilizados nas comparações. Estes modelos foram escolhidos tomando como base a facilidade para escolha dos parâmetros de funcionamento em âmbito industrial, ou seja, foram escolhidos modelos que possam ser implementados sem necessidade de etapas de treinamento ou processos de busca de ganhos muito complexos.
- **Capítulo 4** - Neste momento do trabalho, é feita uma ligação entre os tópicos apresentados nos Capítulos anteriores. Descreve-se as simulações realizadas bem como o conjunto de passos sistemáticos adotados para obtenção dos resultados, incluindo a descrição dos parâmetros utilizados em cada controlador em suas específicas leis de controle. Tabelas e gráficos ilustram o desempenho dos modelos de controladores adotados.
- **Capítulo 5** - Este capítulo finaliza o presente trabalho resumindo os resultados obtidos e apresentando as principais contribuições da dissertação. Além do mais, aponta uma série de possíveis direções e trabalhos futuros que seguem a mesma linha de pesquisa e poderão contribuir com o enriquecimento deste trabalho.

2 Introdução à Dinâmica de Manipuladores

Dinâmica é o campo de estudo dedicado às forças necessárias para fazer com que ocorra movimento. De modo a acelerar um manipulador do repouso, movimentar o sistema com uma determinada velocidade e, posteriormente, desacelerar até parar, um complexo conjunto de funções de torque deve ser aplicado pelos atuadores presentes em cada junta (CRAIG, 2005).

O estudo das equações da dinâmica permite obter uma relação entre o movimento dos elos e as forças e torques dos atuadores que estão agindo no manipulador; tais equações são importante para o projeto de robôs, simulações de movimentos, bem como no projeto de algoritmos de controle. A forma das funções de torque do atuador depende de um conjunto de atributos espaciais e temporais, do caminho percorrido, de propriedades de massa dos elos, carga útil, atrito nas juntas, além de outras variáveis que podem influenciar na física do manipulador.

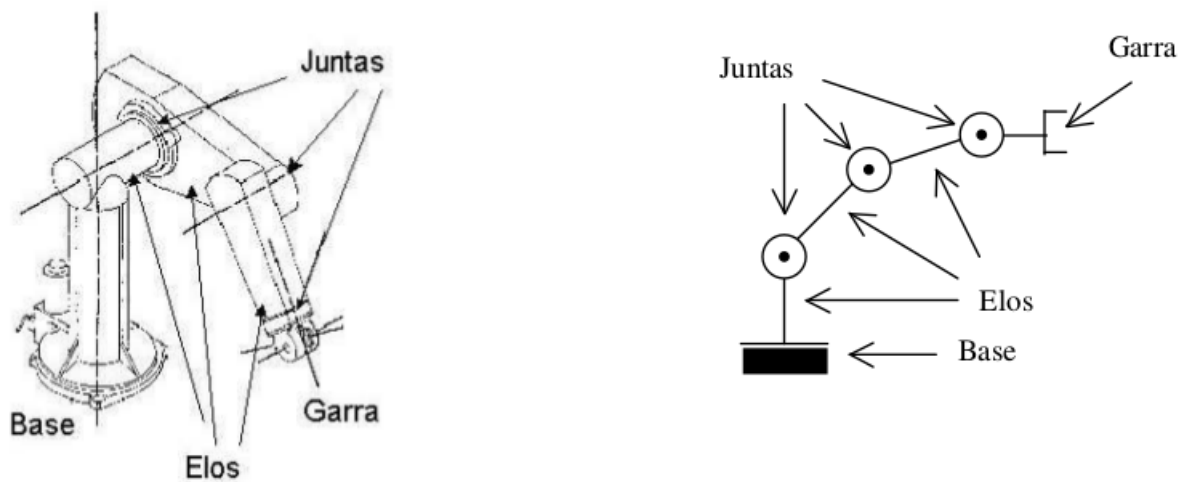
Um modo de controlar um manipulador para seguir um caminho desejado envolve o cálculo das funções de torque dos atuadores, as quais podem ser obtidas, usando uma abordagem muito comum, através da equação de Euler-Lagrange. Esta formulação permite determinar o comportamento dinâmico de um sistema a partir da quantidade de trabalho e energia armazenados, possibilitando, desta forma, obter a equação de movimento do manipulador. Antes de se iniciar o estudo das equações da dinâmica propriamente ditas, será realizado um apanhado conceitual sobre manipuladores industriais e de seus componentes, bem como serão apresentadas algumas estruturas normalmente utilizadas em robôs industriais.

Neste trabalho, questões relativas à cinemática não foram abordadas pois dizem mais respeito ao problema do planejamento de trajetória, tema este que não é tratado aqui.

2.1 Manipulador Industrial

Conforme dito anteriormente, um robô industrial é uma máquina na qual o mecanismo geralmente consiste de uma série de segmentos articulados ou deslizantes um em relação ao outro, com o objetivo de agarrar, movimentar ou manipular objetos ou ferramentas. A parte final da cadeia cinemática que normalmente é a responsável por executar o trabalho é chamada de garra ou efetuador. A figura 2 mostra um esquema de um manipulador industrial apresentando algumas de suas partes integrantes.

Figura 2 – Elos e juntas de um manipulador.



Fonte: Adaptado de [LOST ART \(2015\)](#)

2.1.1 Elos

Um elo é um corpo rígido que define a relação entre os eixos de duas juntas vizinhas de um manipulador ([CRAIG, 2005](#)). A conexão destes elos formando uma cadeia cinemática onde cada elo tem um movimento em relação aos demais, e é isto que caracteriza um manipulador robótico.

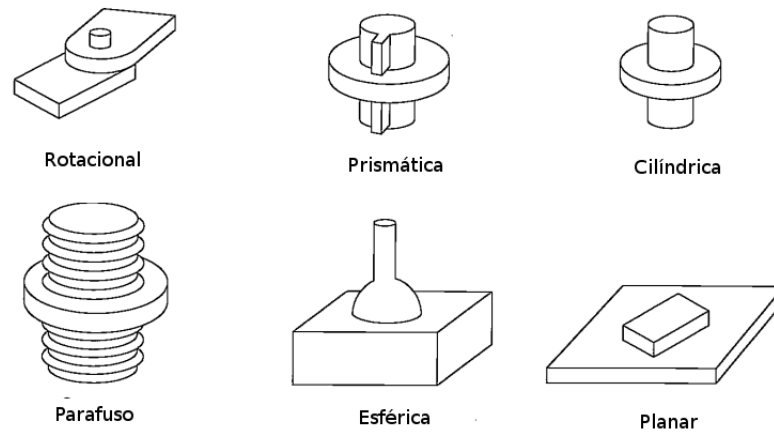
2.1.2 Juntas

As juntas são responsáveis por conectar os elos entre si, possibilitando o movimento relativo entre estes através da ação de atuadores que fornecem o torque necessário para a movimentação. As juntas podem ser classificadas quanto ao tipo de movimento e aos graus de liberdade que permitem que os elos tenham entre si. No geral, existem seis configurações possíveis como está mostrado na figura 3, porém as mais comumente utilizadas são as juntas prismáticas e as de revolução. As juntas de revolução são antropomórficas, ou seja, possuem um funcionamento semelhante aos das juntas humanas, ao passo que as juntas prismáticas são capazes de se estender e de se contrair.

Muitos dos manipuladores industriais apresentam seis ou menos graus de liberdade, onde normalmente as três primeiras juntas são responsáveis pelo posicionamento do efetuador no espaço e as demais pela orientação deste no espaço. Manipuladores costumam ser classificados com base nas orientações e tipos das três primeiras juntas que compõem a cadeia cinemática. A grande maioria pode ser colocada em uma das cinco categorias a seguir: articulado, esférico, SCARA, cilíndrico e cartesiano ([SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2006](#)).

Embora apresentem grande variedade comercial, nos manipuladores articulados as

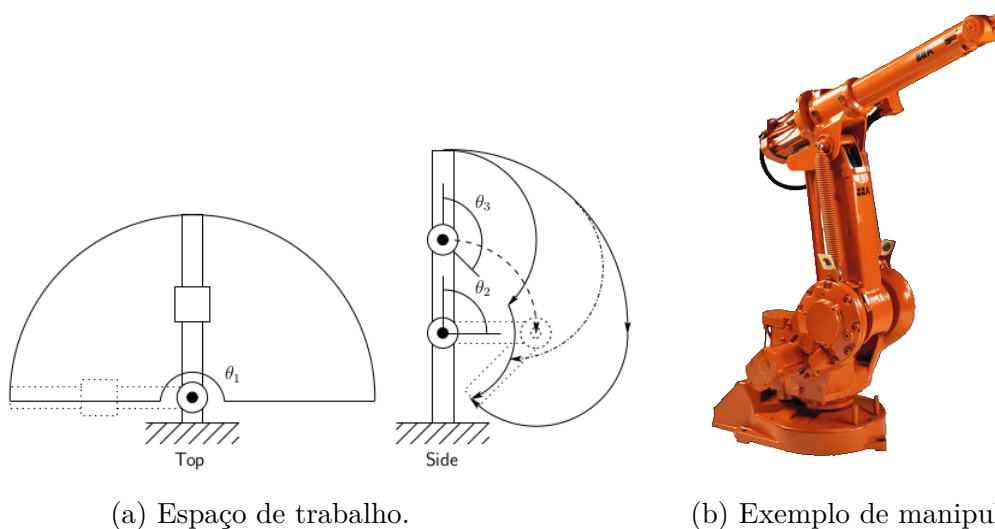
Figura 3 – Possíveis configurações de juntas.



Fonte: Adaptado de [Craig \(2005\)](#)

três primeiras juntas são do tipo rotacional; a segunda e a terceira juntas são coplanares e trabalham em conjunto para produzir movimento no plano vertical, enquanto que a primeira possui um eixo vertical, permitindo assim, a rotação em torno deste. Essa combinação permite uma larga liberdade de movimentos em um ambiente compacto. Para ilustrar, o espaço de trabalho e um modelo real de um manipulador deste tipo podem ser vistos na figura 4.

Figura 4 – Manipulador do tipo articulado.

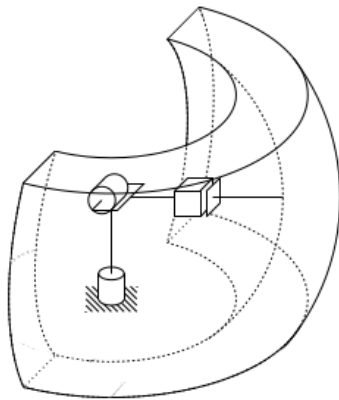


Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)

Fonte: Extraído de [PCRobotics Ltd \(2015\)](#)

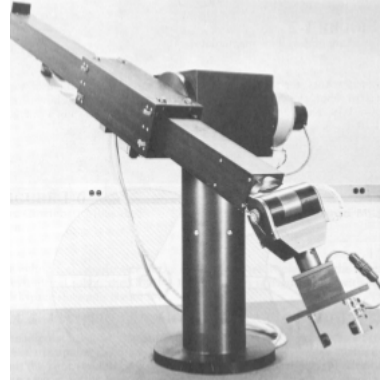
Nos manipuladores esféricos, por sua vez, as duas primeiras juntas são do tipo rotacional (e são ortogonais entre si) e, a terceira, é prismática. A figura 5 ilustra o espaço de trabalho e um exemplo deste tipo de manipulador.

Figura 5 – Manipulador do tipo esférico.



(a) Espaço de trabalho.

Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)

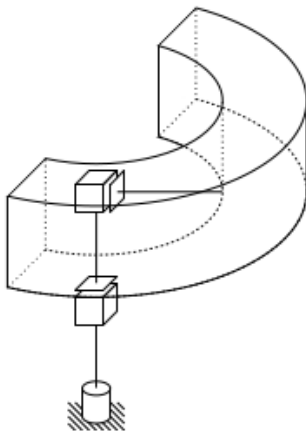


(b) Exemplo de manipulador.

Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)

Os manipuladores cilíndricos, como mostrados na figura 6, apresentam a primeira junta do tipo rotacional seguida de duas do tipo prismática. O nome vem do fato de a posição e orientação do efetuador poderem ser dadas em função de coordenadas cilíndricas. Atualmente existem poucos modelos comerciais disponíveis de manipuladores esféricos e cilíndricos e um dos fatores a que isto se deve são os problemas decorrentes da junta prismática e dos movimento de extensão e contração ([LEWIS; DAWSON; ABDALLAH, 2003](#)).

Figura 6 – Manipulador do tipo cilíndrico.



(a) Espaço de trabalho.

Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)



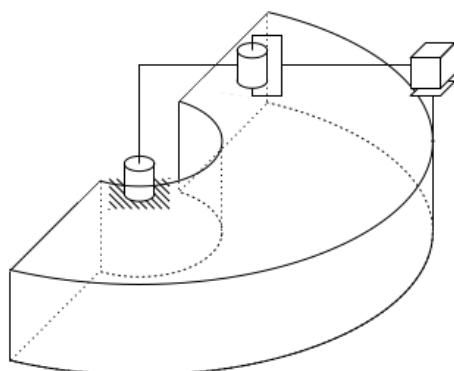
(b) Exemplo de manipulador.

Fonte: Extraído de [GrabCAD \(2015\)](#)

Os manipuladores SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly)

apresentam, assim como o esférico, as duas primeiras juntas rotacionais e, a terceira, prismática. O arranjo geométrico é, contudo, semelhante ao da figura 7. Manipuladores do tipo SCARA são muito utilizados em tarefas de montagem.

Figura 7 – Manipulador do tipo SCARA.



(a) Espaço de trabalho.

Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)

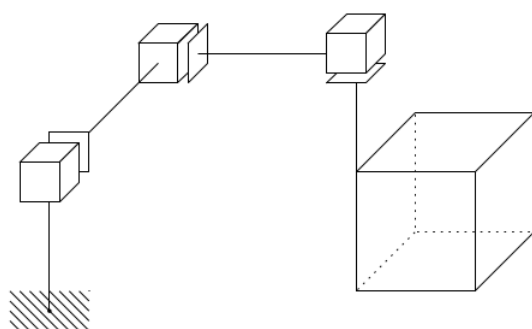


(b) Exemplo de manipulador.

Fonte: Extraído de [ADEPT TECHNOLOGY, INC \(2015\)](#)

Manipuladores cartesianos são aqueles que apresentam as três primeiras juntas do tipo prismática em um arranjo ortogonal para movimentar o efetuador através do espaço de trabalho retangular. Como pode ser visto na figura 8 temos que a posição do efetuador pode ser dada em função de coordenadas cartesianas. Este tipo de manipulador é muito utilizado para transporte de carga, o que faz com que existam robôs deste tipo com os mais diversos tamanhos e capacidade de carga disponíveis no mercado.

Figura 8 – Manipulador cartesiano.



(a) Espaço de trabalho.

Fonte: Extraído de [Spong, Hutchinson e Vidyasagar \(2006\)](#)



(b) Exemplo de manipulador.

Fonte: Extraído de [Fimar \(2015\)](#)

2.2 A Equação do Movimento

Um robô manipulador é, antes de tudo, um dispositivo de posicionamento. Para ser possível controlar a posição, é necessário conhecer as propriedades dinâmicas do manipulador e, assim, determinar qual força deve ser exercida sobre ele para movimentá-lo de forma a evitar lentidão ou oscilações em torno da posição desejada. A equação da dinâmica de um manipulador pode ser obtida através das equações de Euler-Lagrange. Esta equação nos dará uma relação entre as forças generalizadas agindo em uma junta e a posição e velocidade desejada no movimento. O método de Lagrange depende das posições q e das velocidades \dot{q} , bem como do vetor de forças generalizadas \mathcal{Q} sendo formalizada pela seguinte expressão:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \mathcal{Q}, \quad (2.1)$$

em que o lagrangiano \mathcal{L} é dado pela diferença da energia cinética \mathcal{K} de um sistema com a energia potencia \mathcal{U} do mesmo, ou seja $\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{U}$.

Como um manipulador é uma cadeia cinemática é necessário aplicar a equação de Lagrange em cada junta. Desta forma, a equação 2.1 pode ser reescrita em função de cada junta i como sendo da forma:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = \mathcal{Q}_i. \quad (2.2)$$

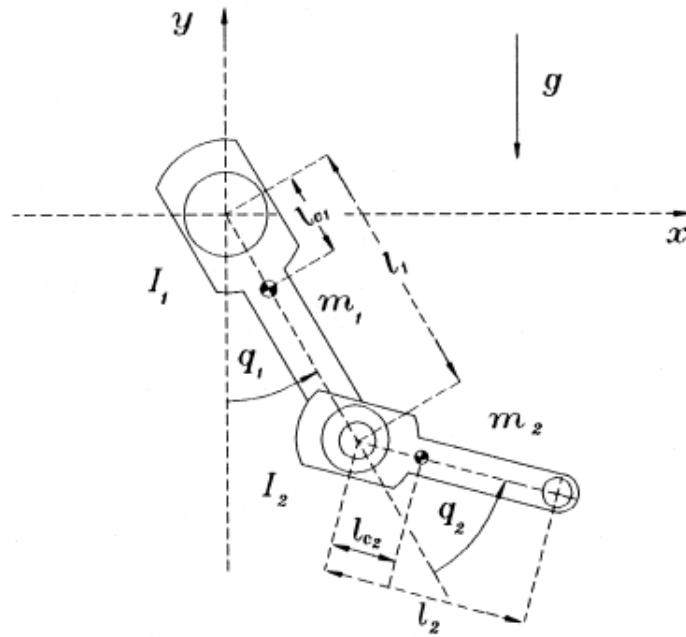
Nesta dissertação, o modelo de robô utilizado para comparação e estudo das técnicas de controle foi o de um robô de dois graus de liberdade de juntas rotacionais coplanares, que é compatível com as articulações principais de robôs articulados. O modelo de manipulador utilizado pode ser visto na figura 9 com todas as suas características de comprimento (l), distância do centro de massa (l_c), momento de inércia (I) e massas (m).

Para que seja possível fazer o uso da equação 2.1, será necessário calcular as energias potenciais e cinéticas de cada junta, então, obter a energia total através do somatório da energia cinética com a energia potencial. Assim a energia cinética \mathcal{K}_i de uma junta pode ser obtida em função da massa m_i , da velocidade escalar do centro de massa v_i , do momento de inércia com relação ao centro de massa \mathcal{I}_i e da velocidade angular \dot{q}_i da junta. Já a energia potencial \mathcal{U}_i da junta é obtida através da massa m_i da junta e da altura h_i entre centro de massa da junta e o sistema de referência global além de um termo g relacionado ao valor da gravidade. Ambas energias são dadas pelas equações a seguir:

$$\mathcal{K}_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} \mathcal{I}_i \dot{q}_i^2, \quad (2.3)$$

$$\mathcal{U}_i = m_i g h_i, \quad (2.4)$$

Figura 9 – Modelo de manipulador simulado.



Fonte: Extraído de [Reyes e Kelly \(2001\)](#)

Calculando a energia cinética da junta 1 do modelo do manipulador, tem-se:

$$\mathcal{K}_1 = \frac{1}{2}m_1l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}\mathcal{I}_1\dot{q}_1^2.$$

Repetindo o processo desta vez para o cálculo da energia cinética da junta 2, teremos uma componente da energia vinda do movimento de translação provocada pela influência da junta 1 sobre a junta 2, e uma componente da energia vinda do movimento de rotação, tem-se então que:

$$\mathcal{K}_2 = \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2[\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2] + m_2l_1l_{c2}[\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2]\cos(q_2) + \frac{1}{2}\mathcal{I}_2[\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2.$$

Calculando a energia potencial das juntas, chega-se a $\mathcal{U}_1 = -m_1gl_{c1}\cos(q_1)$ para a junta 1 e $\mathcal{U}_2 = -m_2gl_1\cos(q_1) - m_2gl_{c2}\cos(q_1 + q_2)$ para a junta 2.

$$\mathcal{K} = \mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_2 + \mathcal{K}_3 + \dots + \mathcal{K}_n \quad (2.5)$$

$$\mathcal{U} = \mathcal{U}_1 + \mathcal{U}_2 + \mathcal{U}_3 + \dots + \mathcal{U}_n \quad (2.6)$$

Agora que os valores de energia potencial e cinética de cada junta já foram obtidos, é possível calcular o valor total de energia através das equações 2.5 e 2.6 para que assim seja possível aplicar na equação 2.2 e obter a equação de movimento de cada junta.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2] \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) [\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2] + [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \cos(q_1) + m_2 g l_{c2} \cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} \mathcal{I}_1 \dot{q}_1 + \frac{1}{2} \mathcal{I}_2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2]^2$$

Com o Lagrangiano obtido, é possível aplicar as derivadas necessárias para, assim, obter a relação de movimentos. Derivando para a junta de número um, obtemos as seguintes equações:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} = [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2] \dot{q}_1 + m_2 l_{c2}^2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2] + [m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2)] [2\dot{q}_1 + \dot{q}_2] + \mathcal{I}_1 \dot{q}_1 + \mathcal{I}_2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2],$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_1} \right] = [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2)] \ddot{q}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2)] \ddot{q}_2 - 2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2 + \mathcal{I}_1 \ddot{q}_1 + \mathcal{I}_2 [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2],$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_1} = -[m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \sin(q_1) - m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2),$$

tomando as derivadas para a junta dois, obtém-se o seguinte grupo de equações:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} = m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_1 + m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \dot{q}_1 + \mathcal{I}_2 [\dot{q}_1 + \dot{q}_2],$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_2} \right] = m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_1 + m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \ddot{q}_1 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \mathcal{I}_2 [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2],$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_2} = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) [\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1^2] - m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2).$$

Com todas as derivadas calculadas, chega-se à equação do movimento para cada junta, ou seja:

$$\mathcal{Q}_1 = [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2] \ddot{q}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + \mathcal{I}_2] \ddot{q}_2 - 2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2^2 + [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \sin(q_1) + m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2)$$

$$\mathcal{Q}_2 = [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + \mathcal{I}_2] \ddot{q}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + \mathcal{I}_2] \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1^2 + m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2)$$

Esta metodologia pode ser utilizada para obter a dinâmica de qualquer robô de n graus de liberdade. Muitas vezes, a equação de movimento é apresentada em uma forma reduzida obtida a partir de uma modificação da equação da energia. A energia cinética associada a um mecanismo articulado pode ser expressa, em forma matricial, como

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.7)$$

A matriz $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ é quadrada de ordem igual ao número de juntas do manipulador, e é chamada de matriz de inércia. Esta matriz é simétrica e definida positiva para todo valor do vetor-posição \mathbf{q} . A energia potencial não pode ser escrita em uma forma composta de uma matriz como a mostrada para a energia cinética na equação 2.7, mas sabe-se que ela é dependente do vetor de posições \mathbf{q} . Utilizando estes elementos, podemos escrever o Lagrangiano na forma matricial como sendo:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \mathcal{U}. \quad (2.8)$$

Com o Lagrangiano em mãos, pode-se escrever a equação de Lagrange da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] \right] - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \mathbf{q}} = \mathcal{Q}. \quad (2.9)$$

Resolvendo as derivadas da equação, chega-se à seguinte expressão:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left[\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right] + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial \mathbf{q}} = \mathcal{Q}, \quad (2.10)$$

cuja forma compacta é dada por:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathcal{Q}. \quad (2.11)$$

A equação (2.11) representa a dinâmica de um manipulador de n graus de liberdade. $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}$ é um vetor de dimensão igual ao número de juntas do manipulador chamado de vetor de forças centrífugas e de Coriolis; $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ também é um vetor de dimensão igual ao número de juntas do manipulador chamado de vetor de forças gravitacionais e \mathcal{Q} é o vetor de forças externas generalizadas agindo sobre o sistema, normalmente correspondendo ao torque dos atuadores e ao atrito agindo sobre as juntas e possui a mesma dimensão que os dois vetores mencionados anteriormente.

No caso do modelo do robô adotado nesta dissertação, tem-se que sua equação da dinâmica reduzida é da forma:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \mathcal{Q},$$

onde os valores de cada elemento das matrizes são definidos a seguir.

$$M_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 [l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2)] + \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2,$$

$$M_{12} = m_2 [l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)] + \mathcal{I}_2,$$

$$M_{21} = m_2 [l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)] + \mathcal{I}_2,$$

$$\begin{aligned}
M_{21} &= m_2 l_{c2}^2 + \mathcal{I}_2, \\
C_{11} &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2, \\
C_{12} &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) [\dot{q}_1 + \dot{q}_2], \\
C_{21} &= m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1, \\
C_{22} &= 0, \\
g_1 &= [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \sin(q_1) + m_2 l_{c2} g \sin(q_1 + q_2), \\
g_2 &= m_2 l_{c2} g \sin(q_2 + q_2).
\end{aligned}$$

O vetor \mathcal{Q} pode ser escrito como sendo o somatório do vetor de atritos com o vetor de torques dos atuadores, desta forma é possível escrever a equação em função deste dois vetores. Para fins de modelagem do efeito da fricção é possível considerar que as forças e torques resultantes deste efeito são dependentes da velocidade relativa entre os corpos em contacto, assim pode-se escrever os efeitos da fricção como (KELLY; DAVILA; PEREZ, 2006):

$$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} f_1(\dot{q}_1) \\ f_2(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ f_n(\dot{q}_n) \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

onde $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})$ é o vetor de atrito de dimensão igual ao número de juntas do manipulador, este vetor pode ser encontrado por meio da seguinte equação:

$$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{F}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_c \mathbf{sign}(\dot{\mathbf{q}}). \quad (2.13)$$

As matrizes \mathbf{F}_v e \mathbf{F}_c são matrizes quadradas, diagonais e definidas positivas que representam respectivamente o atrito viscoso e dinâmico do sistema. O vetor $\mathbf{sign}(\dot{\mathbf{q}})$ apresenta a mesma dimensão que o vetor $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})$ e pode ser representado como:

$$\mathbf{sign}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathit{sign}(\dot{q}_1) \\ \mathit{sign}(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \mathit{sign}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

A função $\mathit{sign}(x)$ é dado por:

$$\mathit{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases}. \quad (2.15)$$

Dessa forma tem-se que o modelo dinâmico do sistema agora com o efeito do atrito separado do efeito da ação dos atuadores é representado como mostrado na seguinte expressão:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) = \mathcal{T}. \quad (2.16)$$

É possível observar que o vetor \mathcal{Q} não existe mais na equação, isto se deve ao fato dele ter sido decomposto no vetor de atrito $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})$ e no vetor de torques dos atuadores \mathcal{T} .

Para evitar o problema do torque máximo dos motores foi inserido no sistema um saturador, de forma que evite os picos de corrente que no sistema real poderiam vir a danificar o sistema. Assim o torque τ_i da junta i não pode ultrapassar o torque máximo do motor τ_i^{max} . Esse saturador pode ser modelado de forma (LLAMA; KELLY; SANTIBAÑEZ, 2001):

$$sat(\tau_i) = \begin{cases} \tau_i & se \quad |\tau_i| < \tau_i^{max} \\ \tau_i^{max} & se \quad \tau_i \geq \tau_i^{max} \\ -\tau_i^{max} & se \quad \tau_i \leq -\tau_i^{max} \end{cases}. \quad (2.17)$$

O sistema pode ser escrito de forma a englobar o saturador conforme mostrado na expressão:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) = sat(\mathcal{T}). \quad (2.18)$$

Obtida a equação da dinâmica do sistema é possível elaborar um algoritmo para realizar a simulação computacional do robô desejado, para isto será necessário reescrever a equação conforme mostrado abaixo.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})[sat(\mathcal{T}) - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})]. \quad (2.19)$$

Com o novo arranjo da equação é possível realizar integrações para obter as posições e velocidades desta forma tem-se o necessário para o modelo computacional do robô. O próximo passo é o projeto dos controladores a serem utilizados no modelo do robô. O capítulo seguinte busca detalhar melhor o projeto e descrição dos controladores empregados nesta dissertação.

3 Controle de Robôs Manipuladores

Apresentadas as equações que regem a dinâmica de um manipulador industrial, o passo seguinte no seu estudo é o projeto do controlador. Basicamente a função de um controlador é manter as variáveis de saída de um sistema em um estado desejado, sejam estas temperatura, pressão, velocidade, entre outras. Isto é feito mediante oportuna ação de controle, a qual depende das variáveis de entrada do sistema e age modificando as de saída.

Em manipuladores robóticos, as variáveis que normalmente se procura controlar são a posição e a velocidade do efetuador. Em certas aplicações há também o interesse de controlar a força exercida pelo efetuador. Nesta dissertação o foco é o controle de posição. Nos manipuladores, as variáveis de entrada, que podem ser modificadas de forma a afetar o estado das variáveis de saída, normalmente são os torques e as forças aplicadas pelos atuadores sobre juntas (vide figura 10).

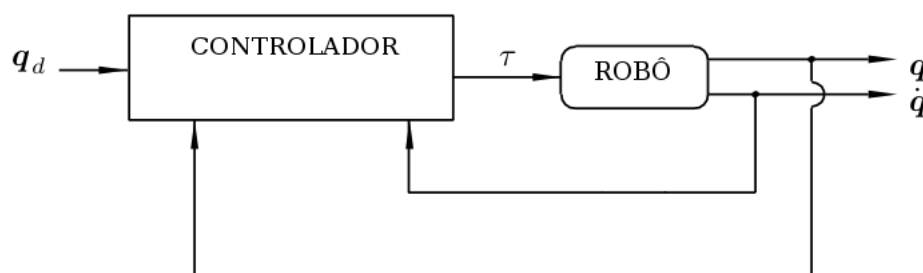
Figura 10 – Esquema de variáveis de entrada e saída de um manipulador industrial.



Fonte: O autor.

O trabalho do controlador de um manipulador industrial então consiste em fornecer os valores de torques para que seja possível realizar a movimentação para a posição q_d desejada (vide figura 11).

Figura 11 – Controle de posição em malha fechada.



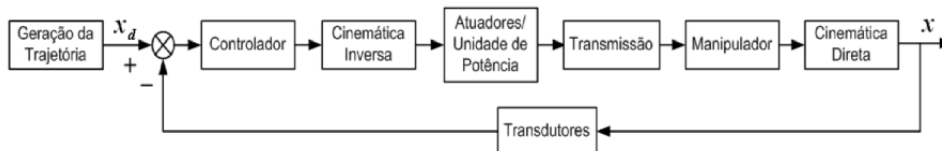
Fonte: Adaptado de Kelly, Davila e Perez (2006)

A forma mais simples de especificar o movimento de um manipulador é através do método ponto a ponto. Este método consiste em determinar uma série de pontos no espaço de trabalho do manipulador pelos quais o efetuador deva passar, desta forma, o controle de posição consiste em fazer o efetuador ir para os pontos específicos até chegar ao ponto final. Uma outra forma de especificar o movimento, mais geral que aquela, é através de uma trajetória única que liga o ponto inicial ao ponto final desejado, na forma de uma curva parametrizada no tempo. Neste caso, o controle de posição consiste em fazer o efetuador seguir esta curva o mais próximo possível.

O controle de robôs manipuladores pode ser executado seja no espaço das juntas, seja no espaço operacional (MELO, 2015). Quando o controle ocorre no espaço operacional, conforme ilustrado na figura 12, as ações de controle são realizadas em relação à posição cartesiana do efetuador, corrigindo os sinais de posição. Quando o controle ocorre no espaço da juntas (vide figura 13), as ações de controle são realizadas de forma que haja correção da posição angular.

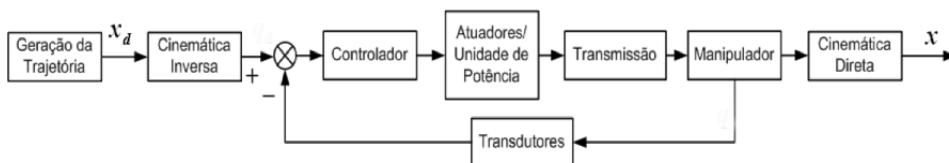
Para realizar o controle de posição tanto ponto a ponto como trajetória, são utilizadas técnicas de controle convencionais que utilizam ganhos fixos e técnicas mais modernas que modificam os valores dos ganhos dos controladores com base em atributos do sistema em estudo.

Figura 12 – Controle no espaço operacional.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

Figura 13 – Controle no espaço das juntas.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

3.1 Controladores Convencionais

Normalmente os controladores convencionais tem seu princípio de funcionamento baseado em calcular o erro e entre a resposta do sistema q (posição real do manipulador)

e a resposta desejada \mathbf{q}_d (posição desejada) conforme a seguinte expressão:

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}, \quad (3.1)$$

e buscar levar este erro ao menor valor possível através da ação de seus ganhos. Para que se obtenha o melhor desempenho em uma determinada aplicação, é necessário fazer o ajuste dos ganhos do controlador alterando o seu comportamento.

Algumas técnicas convencionais de controle normalmente utilizadas em robôs industriais são o controle proporcional derivativo (PD), ilustrado na figura 14, controle proporcional derivativo com compensação de gravidade (vide figura 15) e o controle proporcional integral derivativo (PID), mostrado na figura 16. Todas estas técnicas de controle tem seu funcionamento baseado essencialmente no efeito de três ganhos: o ganho proporcional, o ganho derivativo e o ganho integrativo. O termo proporcional visa dar uma resposta rápida a uma ação de controle agindo de forma proporcional ao valor do erro, se o erro é grande a variável de controle também será grande. O ganho integrativo garante que a resposta do sistema esteja o mais próximo possível do valor desejado, buscando levar o erro a zero através da acumulação dos valores dos erros ao longo do tempo, assim, se o erro acumulado for grande a ação de controle do termo integral também será. O ganho derivativo responde a variações bruscas no erro promovendo a estabilidade do sistema.

3.1.1 Controlador Proporcional Derivativo

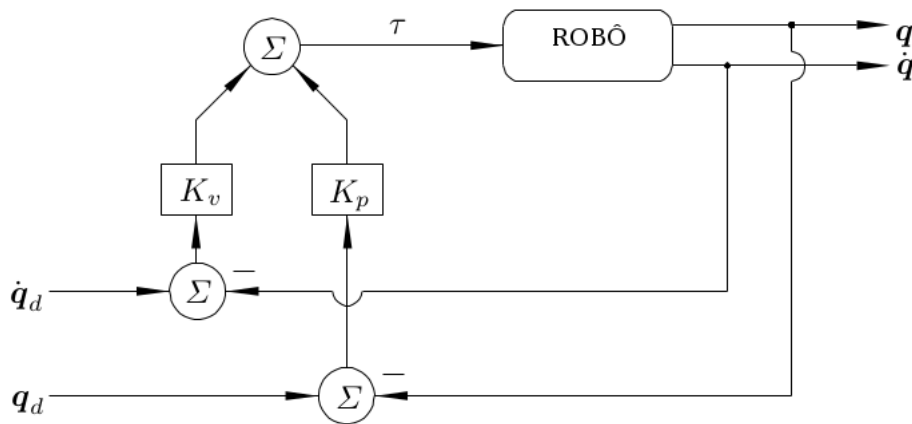
No controle de manipuladores é utilizada normalmente uma abordagem que considera o problema de múltiplas entradas e múltiplas saídas como sendo um conjunto de problemas mais simples, desta forma, mesmo o manipulador tendo a posição de cada junta influenciando nas demais, é considerado que cada junta tem um controlador dependente somente do erro de posição dela mesma. Tem-se assim um controle independente de cada junta, onde o problema de múltiplas entradas é resolvido como muitos de uma única entrada, facilitando assim, o planejamento dos controladores. A equação do controlador PD de um manipulador de n graus de liberdade é dada por:

$$\mathcal{T} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}, \quad (3.2)$$

onde \mathbf{K}_p e \mathbf{K}_v são matrizes quadradas diagonais de dimensão $n \times n$ simétricas e definidas positivas dos ganhos proporcionais e derivativos respectivamente, e estão organizadas de forma que o ganho da primeira junta se encontra na primeira linha da matriz e assim suscetivamente, e o vetores \mathbf{e} e $\dot{\mathbf{e}}$, ambos de dimensão n , denotam os erros de posição e suas derivadas. A figura 14 mostra o diagrama de blocos de um controlador deste tipo.

Quando aplicado no controle de juntas para determinar os torques, o controlador PD depende somente das posições e velocidades das juntas onde está sendo aplicado e de

Figura 14 – Diagrama de blocos de controlador PD.



Fonte: Adaptado de Kelly, Davila e Perez (2006)

nenhum outro dado das demais articulações. Esta forma de controle é chamada controle independente das juntas e, em manipuladores industriais, é amplamente utilizada. Desta forma, apesar da dependência existente entre as juntas, cada uma recebe um controlador que só leva em conta os seus próprios erros de posição e velocidade.

3.1.2 Controlador PD com Compensação de Gravidade

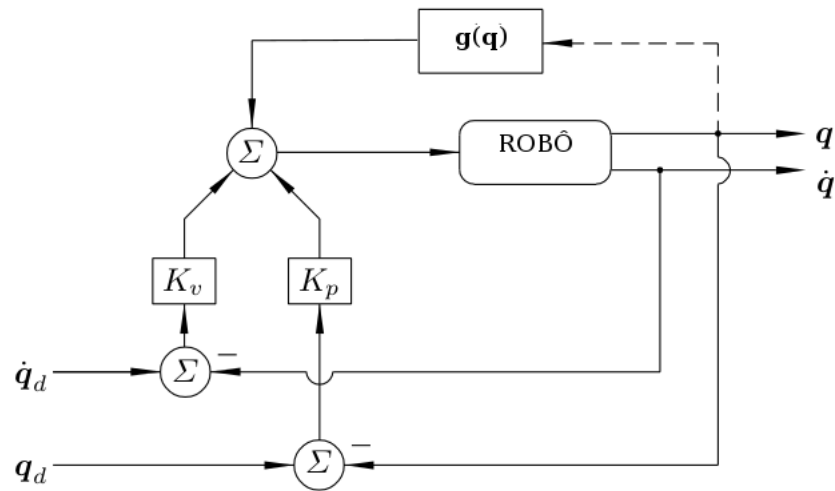
Controladores PD tem bons resultados em manipuladores desde que o termo gravitacional da equação (2.11) seja nulo, como é o caso de robôs do tipo SCARA. Porém, em situações onde isso não acontece, o controlador PD não é capaz de garantir que a posição desejada será obtida.

O controle PD com compensação de gravidade é capaz de superar esta falha do controlador PD, porém é necessário um conhecimento prévio de parte da dinâmica do manipulador, a exemplo dos vetores de torque gravitacional. A equação do controlador PD com compensação de gravidade de um manipulador de n graus de liberdade é dada por

$$\mathcal{T} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}). \quad (3.3)$$

Assim como no controle PD, os termos \mathbf{K}_p e \mathbf{K}_v da equação são matrizes diagonais de dimensão $n \times n$ simétricas e positivas definidas dos ganhos proporcionais e derivativos respectivamente. Diferentemente da equação do controle PD, a equação (3.3) apresenta explicitamente o uso de parte da dinâmica do manipulador dentro da equação de controle, através do termo $\mathbf{g}(\mathbf{q})$. De toda forma, o cálculo do vetor gravitacional é bem simples, visto que vem diretamente da energia potencial do sistema. A figura 15 mostra o diagrama de blocos de um controlador deste tipo.

Figura 15 – Diagrama de blocos de controlador PD com compensação da gravidade.



Fonte: Adaptado de Kelly, Davila e Perez (2006)

3.1.3 Controlador Proporcional Integral Derivativo

A equação do controlador PID é dado por

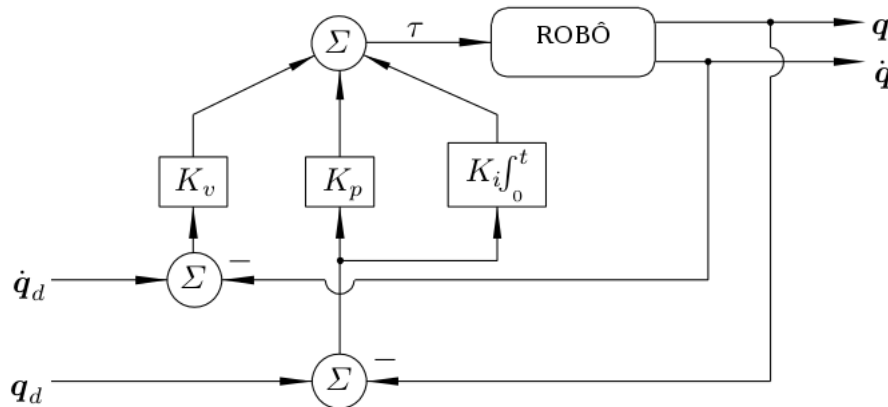
$$\mathcal{T} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}(\sigma) d\sigma. \quad (3.4)$$

Os termos \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_v e \mathbf{K}_i da equação são matrizes quadradas diagonais de dimensão $n \times n$ simétricas e positivas definidas dos ganhos proporcionais, derivativos e integrativos respectivamente. O termo integrativo busca levar o erro de posição de um manipulador para zero por meio da integral dos erros. Desta forma, quanto mais próximo de zero for o valor da integral, menor será a ação do efeito integrativo de forma que quando chegar a zero este terá valor nulo. Atualmente a maioria dos robôs manipuladores industriais utiliza controladores do tipo PID. A ampla utilização de manipuladores em aplicações diárias confirma o desempenho que pode ser conseguido em uma grande variedade de aplicações com o uso do PID (KELLY; DAVILA; PEREZ, 2006).

3.2 Controladores de Ganhos Dinâmicos

As teorias de controle convencionais lidam predominantemente com aproximações de sistemas lineares que possuem parâmetros constantes. Porém, em casos onde as variações são muito amplas, um ganho de realimentação com coeficientes constantes é incapaz de fornecer a flexibilidade necessária para atender às especificações de desempenho. Além disso, muitas aplicações são tão complexas que os princípios de controle de sistemas lineares e invariantes no tempo são insuficientes, sendo necessário estratégias de controle mais eficazes.

Figura 16 – Diagrama de blocos de controlador PID.



Fonte: Adaptado de Kelly, Davila e Perez (2006)

Muitas técnicas podem ser utilizadas para lidar com o problema de controle não linear, tais como o uso de redes neurais, controladores auto-sintonizáveis, sistemas adaptativos por modelo de referência, escalonamento de ganhos, lógica fuzzy, entre outras. Porém, mesmo com todas estas técnicas o controlador clássico PID continua sendo o mais utilizado em âmbito industrial. Um dos grandes motivos é a simplicidade desse controlador, pois sua lei de controle (equação 3.4) não depende diretamente da dinâmica do manipulador, o que simplifica a criação de controladores generalizados para controle de manipuladores industriais, tais como o NI 7340 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013). Com isso, o uso de técnicas que precisem de etapas de treinamento ou que precisem ter toda a sua estrutura modificada para cada modelo diferente onde forem aplicadas tem pouco apelo industrial.

Mas, e se a simplicidade de pôr em funcionamento um controlador apenas escolhendo alguns poucos parâmetros e transcurando a estrutura ou etapas de treinamento (a exemplo de como acontece com o PID) pudesse ser conjugada com a disponibilidade de técnicas de controle não linear? Uma forma de fazer isto é, tomando como partida o funcionamento dos controladores PID, fazer a modificação dos seus ganhos dinamicamente através de um sistema definido de uma forma fechada, em que haveria somente a necessidade de modificar parâmetros dele, e não a estrutura toda.

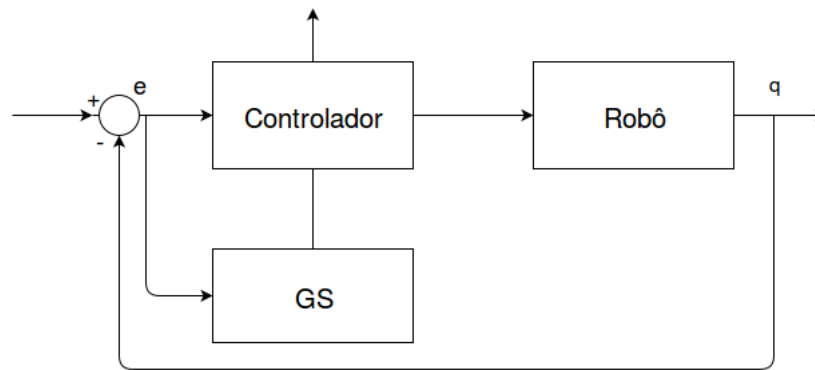
Isso é possível utilizando lógica fuzzy ou uma função não linear (escalonamento de ganhos) para sintonia automática ou semi-automática dos ganhos, por exemplo. Isto requer, contudo, que se encontre uma estrutura fuzzy ou funções não lineares boas o suficiente para que, somente modificando os seus parâmetros, levassem a uma resposta satisfatória do sistema. Desta forma, ao invés de o usuário modificar diretamente os parâmetros do controlador PID, aqui seriam os parâmetros do sistema de sintonia de ganhos do controlador a sofrer modificação. Isto permitiria o desenvolvimento de controladores inteligentes em

placas eletrônicas para concorrer comercialmente com as de controle PID, por exemplo. A seguir serão mencionados como se daria o controle através do escalonamento dos ganhos e através de mudança dos ganhos por lógica fuzzy.

3.2.1 Escalonamento dos ganhos

A técnica de escalonamento dos ganhos, também conhecida como *gain-scheduling* (GS), consiste em ajustar os parâmetros do controlador em função do tempo, condição de operação ou parâmetros da planta. A mudança dos ganhos é realizada através do uso de funções não lineares, as quais recebem as variáveis de entrada e retornam na saída os valores dos ganhos adequados para a realização da tarefa de controle. A figura 17 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle e ajuste por funções não lineares.

Figura 17 – Diagrama de bloco de modelo de escalonamento de ganhos.



Fonte: O autor.

Neste controlador os ganhos proporcionais e derivativos são funções não lineares do erro de posição e , desta forma, temos que os valores dos ganhos são modificados de forma dinâmica. Mais detalhes sobre esse tipo de controlador podem ser encontrados nos trabalhos de Huang, Yang e Ye (2014) e nos de Kelly e Carelli (1996). Aplicando esse ajuste dinâmico aos ganhos proporcionais e derivativos de um controlador PID, teremos uma lei de controle descrita por:

$$\mathcal{T} = \mathbf{K}_p(\mathbf{e})\mathbf{e} + \mathbf{K}_v(\mathbf{e})\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}(\sigma) d\sigma. \quad (3.5)$$

Na equação acima, as matrizes $\mathbf{K}_p(\mathbf{e})$ e $\mathbf{K}_v(\mathbf{e})$ continuam sendo as matrizes de ganhos, porém estas agora são modificados dinamicamente, e a matriz \mathbf{K}_i continua sendo uma matriz dos ganhos integrativos e continua estática. Neste trabalho as funções não lineares usadas para o ajuste dos ganhos foram as mesmas usadas por (HUANG; YANG; YE, 2014). As funções utilizadas por Huang, Yang e Ye (2014) fazem com que os ganhos proporcionais tenham o seu valor aumentado procurando manter a velocidade de resposta sem sobressinal conforme o erro tem seu valor aumentado e é apresentam

redução procurando evitar sobressinal conforme o erro vai decrescendo. Escrevendo então a equação do ganho proporcional para a junta i tem-se:

$$K_p^i(e) = a_i + b_i e_i^2, \quad (3.6)$$

com a_i e b_i sendo parâmetros que alteram a curva de K_p^i e e_i sendo o erro de posição da junta i . Já para os ganhos derivativos tem-se um valor reduzido conforme o valor do erro vai crescendo, buscando assim manter a velocidade de resposta e sem sobressinal, e o ganho apresentará elevação no valor quando o erro apresentar uma redução, desta forma tem-se que a equação é da forma:

$$K_v^i(e) = \frac{c_i}{0.001 + e_i^2}, \quad (3.7)$$

onde c_i é um parâmetro que modifica a curva de K_v^i e e_i é o erro de posição da junta i .

3.2.2 Ajuste dos ganhos com lógica fuzzy

Na teoria clássica de conjuntos, um dado elemento tem caráter binário, ou seja, ou o elemento pertence ou não pertence ao conjunto. A capacidade dos seres humanos de raciocinar de maneira incerta e subjetiva contrasta com essa forma de operar através de raciocínio binário e preciso.

Na lógica fuzzy, proposta por Lotfali Askar Zadeh ([ZADEH, 1965](#)), existe uma caracterização mais ampla da teoria dos conjuntos, na medida em que alguns elementos podem pertencer a mais de um conjunto e de forma que alguns são “mais membros” de um conjunto do que outros. Grosso modo, um sistema fuzzy consiste em um arcabouço formal que tem como meta modelar a capacidade humana de inferência e tomada de decisão diante de situações incertas e/ou ambíguas.

Um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência (função característica ou função de compatibilidade) que associa a cada elemento do universo de discurso um número no intervalo real $[0,1]$ ([MOZELLI, 2008](#)). Assim, o raciocínio binário de pertence ou não pertence, dá lugar ao conceito de pertinência. O valor atribuído pela função característica, indica o grau de pertinência do elemento ao conjunto fuzzy, tem-se que o valor 0 indica total exclusão ao conjunto e 1 indica completa pertinência.

Do ponto de vista prático, normalmente as funções de pertinência assumem as formas triangulares e trapezoidais devido à simplicidade e ao fato do custo computacional adicional exigido pelos outros tipos de funções geralmente não refletirem em uma melhoria significativa na qualidade dos valores de saída dos sistemas.

3.2.2.1 Definições e Operações fuzzy

Assim como na lógica clássica podemos aplicar uma série de operações em conjuntos fuzzy, tais como união, intersecção e complemento. A seguir serão apresentadas algumas

definições e operações que são de interesse deste trabalho, algumas destas ilustradas na figura 18.

Seja um conjunto fuzzy A em um universo de discurso R . Este é dito vazio unicamente se sua função de pertinência μ_A é igual a zero para todos os valores de x pertencentes a R . Isto é:

$$A = \emptyset \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in R.$$

Dois conjuntos fuzzy em um universo R são iguais se suas funções de pertinência forem iguais sobre todo elemento de R . Ou seja, considerando A e B dois conjuntos fuzzy, então para A ser igual a B teremos:

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in R.$$

O complemento A' de um conjunto fuzzy A em um universo R é dado por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in R.$$

A união entre dois conjuntos fuzzy A e B de R é dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in R.$$

A interseção entre dois conjuntos fuzzy A e B de R é dada por:

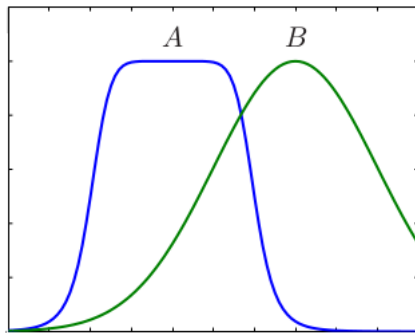
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in R.$$

3.2.2.2 Variáveis Linguísticas

Na teoria fuzzy expressa-se conceitos através de elementos qualitativos em vez de valores quantitativos, como: “muito”, “pouco”, “pequeno”, “grande”, entre outros; estes conceitos são chamados de variáveis linguísticas. Na definição de Zadeh (1975), estas são variáveis cujos valores são nomes ou sentenças, ao invés de assumirem apenas valores específicos como ocorre com variáveis numéricas. A utilização de variáveis linguísticas permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais, estas variáveis são conjuntos fuzzy representados por funções de pertinência.

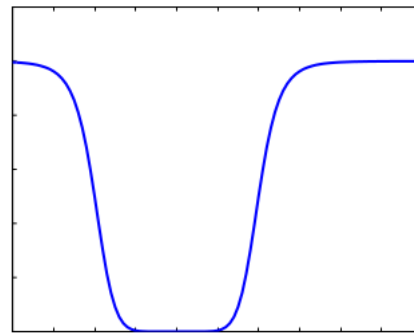
Segundo Tsoukalas e Uhrig (1996), uma variável linguística é composta pelo seu nome (exemplo: erro de posição); pelos possíveis valores fuzzy que pode assumir (exemplo: pequeno, médio e grande), que são os rótulos dos conjuntos fuzzy; pelo universo de discurso e pelas funções de pertinência que associam um grau de pertinência a cada elemento do universo de discurso.

Figura 18 – Gráficos de operações fuzzy.



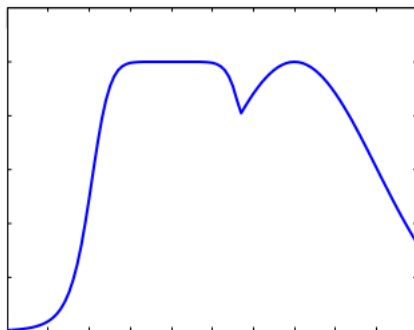
(a) Conjuntos fuzzy A e B.

Fonte: Extraído de Mozelli (2008)



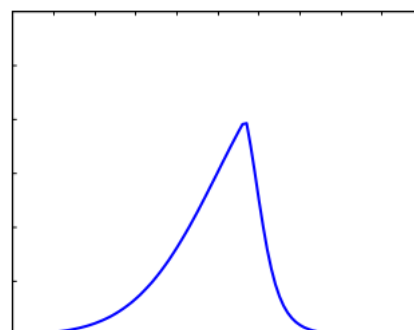
(b) Complemento de A.

Fonte: Extraído de Mozelli (2008)



(c) A união B.

Fonte: Extraído de Mozelli (2008)



(d) A interseção B.

Fonte: Extraído de Mozelli (2008)

3.2.2.3 Regras

A forma mais comum de expressar o conhecimento na lógica fuzzy é através de regras, elas são frequentemente chamadas de condicionais ou regras fuzzy. Em sua grande maioria as regras são expressas através de implicações lógicas do tipo *Se ... Então*. As regras seguem a forma: *se x é A então y é B*, onde A e B são variáveis linguísticas e x e y são elementos dos universos de discurso. A proposição *x é A* normalmente é rotulada como proposição antecedente, já a proposição *y é B* é o conseqüente, x é chamada de variável premissa.

Uma regra é disparada quando houver um grau de similaridade não nulo entre a variável premissa e o antecedente. Como resultado, infere-se uma conclusão que mantenha algum grau de similaridade com o conseqüente da regra (MOZELLI, 2008). Se a variável premissa x possui total similaridade com o antecedente A então a conclusão será que y é o próprio B.

3.2.2.4 Inferência fuzzy

É no sistema de inferência que ocorrem operações com os conjuntos fuzzy usando as regras *Se... Então* para processar os dados de entrada e processar uma conclusão. Inicialmente a inferência atribui valores de pertinência as variáveis premissas, em seguida determina o grau de ativação da regra através da combinação dos graus de compatibilidade das variáveis premissas com seus antecedentes. Com base nos conectivos lógicos presente na premissa da regra e do tipo de norma adotada, obtém-se um grau de ativação para a regra, a partir desse grau de ativação determina-se o consequente produzido por uma determinada regra. De acordo com o grau de ativação o consequente terá um grau de pertinência. É comum um sistema de inferência possuir mais de uma regra cada qual produzindo um consequente, o resultado global da inferência dependerá da combinação desses consequentes, esta etapa tem por resultado um conjunto fuzzy ou uma função (MOZELLI, 2008).

Dependendo do tipo de saída que é dada na inferência, existe uma divisão entre sistema fuzzy Mandani e sistema fuzzy Takagi-Sugeno. O sistema fuzzy Mandani fornece como saída de suas regras um conjunto fuzzy, já o sistema Sugeno, também conhecido como Takagi-Sugeno-Kang, fornece como saída de cada regra uma função das variáveis de entrada do sistema.

Quando os sistemas são do tipo Mandani é necessário transformar o conjunto nebuloso decorrente das regras fuzzy em um valor numérico para a saída. Este processo é chamado de defuzzificação e existem vários métodos de realizá-lo; alguns dos mais comuns são:

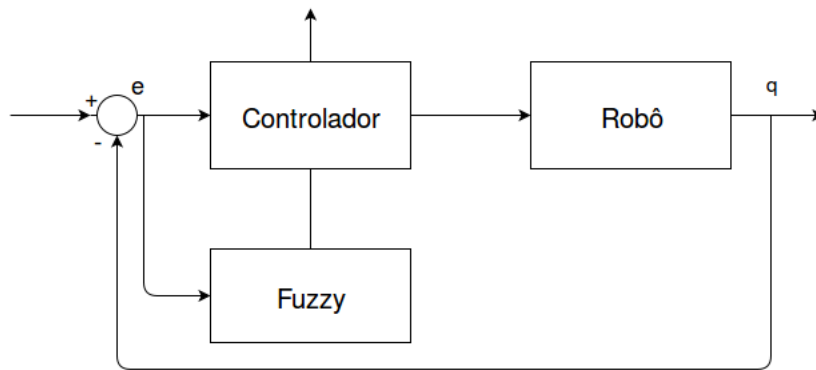
- Centro de gravidade (COG - Center of Gravity): Seu valor é calculado pela abscissa do centro de gravidade do conjunto fuzzy;
- Centro da área (COA - Center of Area): Seu valor é calculado pela abscissa da linha vertical que divide a área resultante em duas áreas iguais;
- Média dos máximos (MOM - Mean of Maxima): O valor é calculado pela média de todos os valores que tenham o maior grau de pertinência;
- Menor dos máximos (SOM - Smallest of Maxima): Seu valor é calculado pelo menor valor que apresente o maior grau de pertinência.

3.2.2.5 O ajuste de ganhos com fuzzy

Para realizar o ajuste dos ganhos através de lógica fuzzy faz-se necessária a escolha das variáveis premissas do sistema e então montar os conjuntos fuzzy e o conjunto de regras a ser utilizado pelo sistema de inferência. O sistema de inferência receberá as variáveis de entrada e retornará na saída um conjunto fuzzy ou uma função dependente

das entradas, que conterà o valor dos ganhos adequados para a realização da tarefa de controle. O capítulo 4 explica quais foram as funções de pertinência e regras utilizadas nesta dissertação. A figura 19 mostra o diagrama de blocos de um controlador com ganhos selecionados através de um sistema fuzzy.

Figura 19 – Diagrama de bloco de modelo fuzzy em ajuste de ganhos de controlador.



Fonte: O autor.

4 Simulações e Resultados

Para a execução das comparações dos algoritmos de controle foi realizada a simulação de um robô de dois graus de liberdade, o mesmo utilizado por [Reyes e Kelly \(2001\)](#) e [Meza et al. \(2012\)](#). Os dados do robô simulado são mostrados na tabela 1; além disso, é admitido que o torque máximo suportado na primeira junta não deve ultrapassar os 200 Nm e, o da segunda junta, os 15 Nm. Estes valores são relacionados às condições de operação dos motores.

Tabela 1 – Dados do robô simulado

	Valor	Unidade
Comprimento elo 1	0,45	m
Comprimento elo 2	0,45	m
Massa elo 1	23,902	Kg
Massa elo 2	1,285	Kg
Centro de massa elo 1	0,091	m
Centro de massa elo 2	0,048	m
Inércia elo 1	1,266	Kg m^2
Inércia elo 2	0,093	Kg m^2
Coefficiente viscoso elo 1	2,288	Nm
Coefficiente viscoso elo 2	0,175	Nm
Coefficiente de Coulomb elo 1	7,17	Nm
Coefficiente de Coulomb elo 2	1,734	Nm

Fonte: Adaptado de [Reyes e Kelly \(2001\)](#)

A simulação foi feita utilizando linguagem Julia, linguagem de alta performance para computação técnica ([JULIA ORG, 2015](#)), juntamente com o método de Dormand-Prince (um membro da família de métodos de Runge-Kutta) para resolução das equações diferenciais; este método avalia seis vezes a função para calcular soluções acuradas de quarta e quinta ordem.

Os controladores utilizados na comparação foram:

- Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID);
- Controlador Proporcional Derivativo com compensação da gravidade (PDG);
- Controlador Proporcional Derivativo com ganho escalonado mais termo integral (GS);
- Controlador Proporcional Derivativo com ganho escalonado por fuzzy mais termo integral (fuzzy Mandany).

4.1 Sintonia dos controladores

O primeiro passo para a sintonia dos controladores foi uma divisão das posições das juntas do robô em três faixas, pequena (entre 0 rad e 0,06 rad), média (entre 0,06 rad e 0,3 rad) e grande (entre 0,3 rad e 6,28 rad). Os controladores deveriam ter o ganho escolhido uma vez e manter o desempenho satisfatório nas três faixas de posição sem reajuste dos ganhos, de forma a verificar a capacidade de adaptação dos controladores.

Para realizar a sintonia dos controladores foi escolhida a posição de 0,05 rad como posição final desejada para ambas as juntas, e foi considerada condição satisfatória de operação aquela onde o controlador tivesse o erro quadrático médio inferior ao valor de $3 \times 10^{-5} \text{ rad}^2$, um sobressinal inferior a 10^{-4} rad e o valor do erro após 2 segundos não passasse de 0.003 rad. O valor de 0,05 foi escolhido pois valores escolhidos dentro da faixa grande e da faixa média de posições não conseguiam ter um bom resultado na faixa pequena, os melhores resultados eram obtidos quando a escolha era feita com valores dentro da faixa pequena. Após encontrados os valores que satisfizessem esses requisitos para a realização da tarefa desejada, os ganhos e parâmetros não eram mais alterados, esta restrição é imposta para verificar se os controladores tem a capacidade de manter o nível de desempenho mesmo sendo colocados para operar em regiões de operação para as quais não foram projetados.

4.1.1 Controladores Clássicos

Para o ajuste do Controlador PID foi utilizado um algoritmo de evolução diferencial (CHIHA; GHABI; LIOUANE, 2012; BINGUL, 2004) para procurar os ganhos com base na minimização do erro quadrático médio. Após este procedimento, foi realizado um ajuste fino dos ganhos de forma a retirar sobressinais e condições fora dos requisitos de operação. O ajuste do controlador PDG foi feito utilizando os ganhos obtidos para o controlador PID como base, porém, fazendo as mudanças necessárias para o sistema operar dentro das especificações desejadas utilizando a nova lei de controle.

Os valores de ganhos para as especificações desejadas são mostrados na tabela 2 para o controlador PID e na tabela 3 para o controlador PDG.

Tabela 2 – Valores utilizados no controlador PID

junta	K_p	K_v	K_i
1	7300	600	100
2	700	20	100

Fonte: O autor

Tabela 3 – Valores utilizados no controlador PDG

junta	K_p	K_v
1	7300	700
2	700	25

Fonte: O autor

4.1.2 Controladores dinâmicos

Os controladores dinâmicos aqui utilizados estão realizando a modificação dos ganhos proporcionais e derivativos (o ganho integrativo não está sendo modificado). O ganho integrativo tem como principal função reduzir o erro estacionário a zero; então, a melhor forma de implementá-lo seria somente ativar este ganho quando o sistema já estivesse entrando no regime estacionário. Porém, a margem de variação deste ganho não é grande quando comparada aos outros dois ganhos neste tipo de aplicação, e, através dos experimentos, verificou-se que a modificação dinâmica deste ganho não acarretava uma melhora significativa de desempenho. Assim, manter o termo integrativo como uma constante se mostrou uma solução ótima, pois o desempenho do sistema mantinha-se praticamente inalterado e o desempenho computacional crescia já que existiam menos processos para seleção de ganhos.

4.1.2.1 Ajuste através de funções não lineares(GS)

A escolha do valor dos parâmetros foi feita com base nos valores de ganhos obtidos para o controlador PID clássico, fazendo-se ajustes para melhor desempenho. Desta forma, foram obtidos os valores apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Valores utilizados no controlador GS

junta	a	b	c
1	7200	210	0,6
2	790	350	0,03

Fonte: O autor

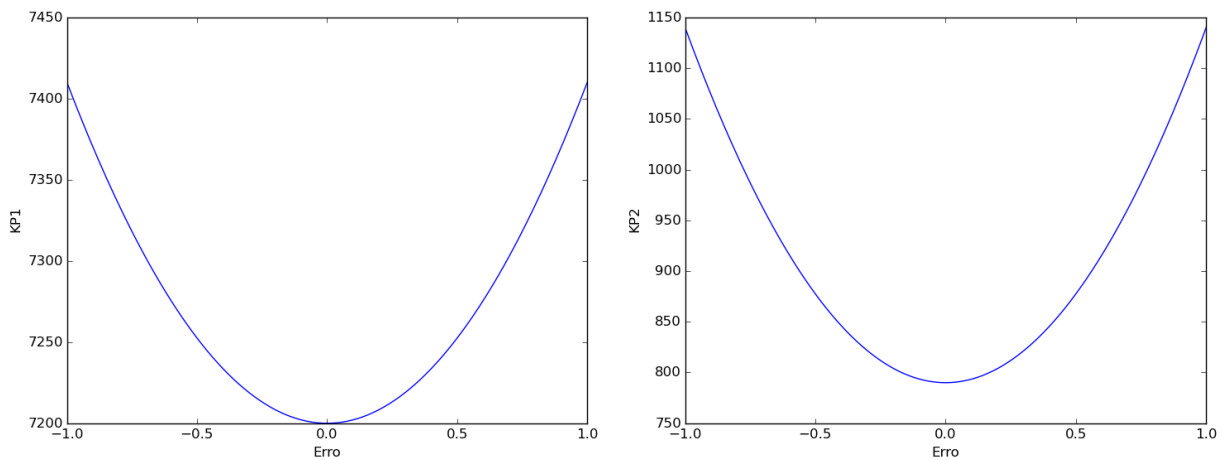
Tabela 5 – Valores ganho integrativo controlador GS

junta	K_i
1	100
2	100

Fonte: O autor

As figuras 20 e 21 mostram as superfícies de decisões dos ganhos proporcionais e derivativos com base nas funções e parâmetros comentados acima.

Figura 20 – Regiões de decisão GS para ganho proporcional.



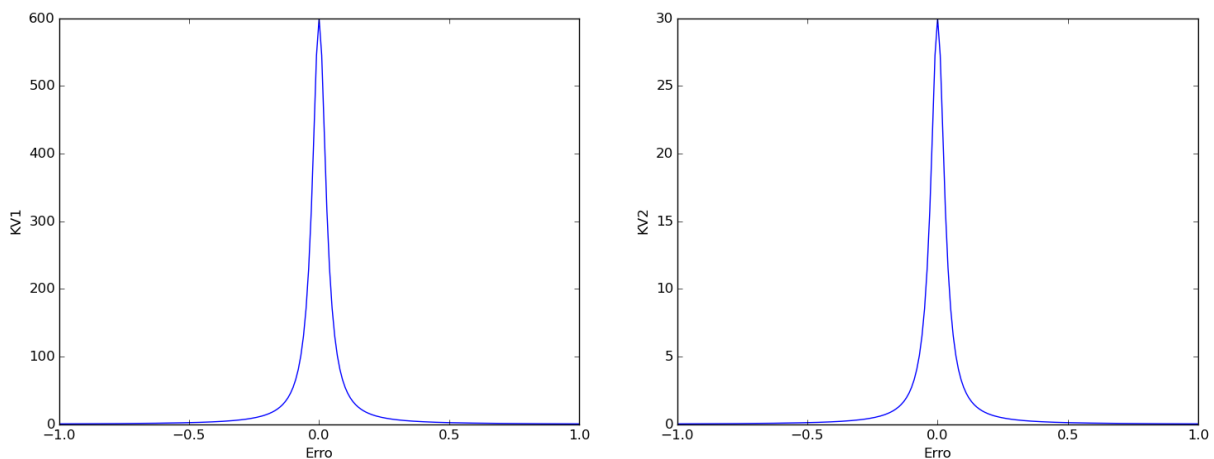
(a) Região de decisão para junta 1.

Fonte: O autor

(b) Região de decisão para Junta 2.

Fonte: O autor

Figura 21 – Regiões de decisão GS para ganho derivativo.



(a) Região de decisão para junta 1.

Fonte: O autor

(b) Região de decisão para Junta 2.

Fonte: O autor

4.1.3 Ajuste por sistema fuzzy

Para aplicação do sistema fuzzy, neste trabalho tomou-se como base uma modificação do modelo Mandani utilizado por [Meza et al. \(2012\)](#). A escolha deste modelo foi realizada com base nos resultados obtidos por eles utilizando apenas como entrada do sistema de inferência fuzzy o erro de posição; nestes observa-se que é possível obter, com somente uma entrada, resultados satisfatórios que reduzam o processamento computacional. A modificação foi feita na escolha dos intervalos dos conjuntos fuzzy e na remoção das escolhas dos ganhos integrativos. No sistema Mandani foram definidos três conjuntos fuzzy trapezoidais, mostrados na figura [22\(a\)](#), chamados pequeno(P), médio(M) e grande(G), para cobrir a variável de entrada (módulo de erro de posição), e três conjuntos, mostrados

na figura 22(b), também chamados de pequeno(P), médio(M) e grande(G), para cobrir a variável de saída (ganhos dos controladores). Da mesma forma que o controlador ajustado por funções não lineares(GS), os valores dos conjuntos fuzzy foram escolhidos com base nos ganhos escolhidos para o controlador PID. As tabelas 6, 7, 8 e 9 mostram os valores utilizados neste trabalho.

Figura 22 – Conjuntos fuzzy utilizados.

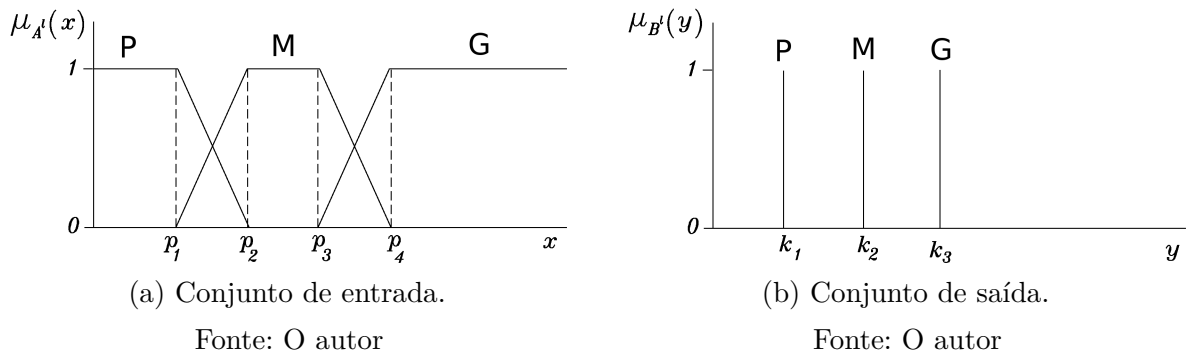


Tabela 6 – Valores utilizados no conjunto de entrada do controlador fuzzy

junta	p_1	p_2	p_3	p_4
1	0,035	0,07	0,17	0,52
2	0,035	0,07	0,17	0,52

Fonte: O autor

Tabela 7 – Valores utilizados no conjunto de saída do controlador fuzzy para ganho K_p

junta	k_1	k_2	k_3
1	2400	3400	3900
2	100	400	700

Fonte: O autor

Tabela 8 – Valores utilizados no conjunto de saída do controlador fuzzy para ganho K_v

junta	k_1	k_2	k_3
1	182	390	400
2	10	15	20

Fonte: O autor

Tabela 9 – Valores ganho integrativo controlador fuzzy

junta	K_i
1	10
2	10

Fonte: O autor

O modelo de regras fuzzy utilizadas no sistema Mandani tem a seguinte forma

$$\begin{aligned}
 IF |e| \text{ é P então } K_p \text{ é G e } K_v \text{ é G} \\
 IF |e| \text{ é M então } K_p \text{ é M e } K_v \text{ é M} . \\
 IF |e| \text{ é G então } K_p \text{ é P e } K_v \text{ é P}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

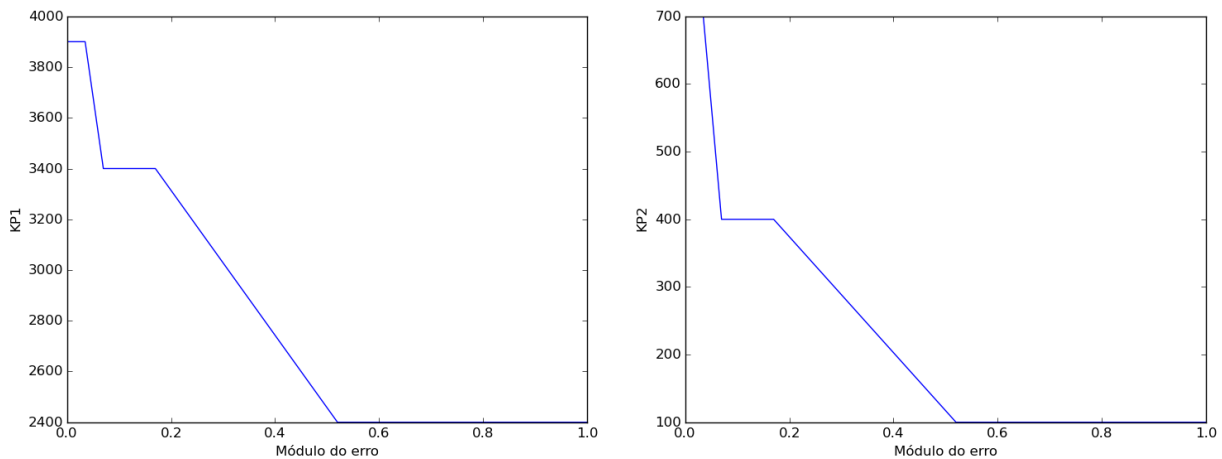
As regras aqui utilizadas são as mesmas de Meza et al. (2012) e tomam como base que, para um pequeno erro de posição é necessário aplicar um grande valor de K_p , buscando reduzir o valor deste erro ainda mais, e um grande valor de K_v , buscando assim evitar respostas oscilatórias. Conforme o valor de erro diminui o valor dos ganhos também decresce pelos mesmos motivos anteriores porém agora adaptado para os valores de erros apropriados.

O modelo de desfuzzyficação utilizado foi o do valor médio, assim a saída y pode ser obtida por

$$y = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{y} \mu_{A^l}(x)}{\sum_{l=1}^m \mu_{A^l}(x)} \quad (4.2)$$

onde m é o número de regras fuzzy utilizadas no modelo e $\bar{y} = \{k1, k2, k3\}$ denota o centro das funções de pertinência do conjunto de saída. Com base nessa estrutura e nos valores escolhidos para os conjuntos, obtém-se as regiões de decisão mostradas nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Regiões de decisão fuzzy para ganho proporcional.



(a) Região de decisão para junta 1.

Fonte: O autor

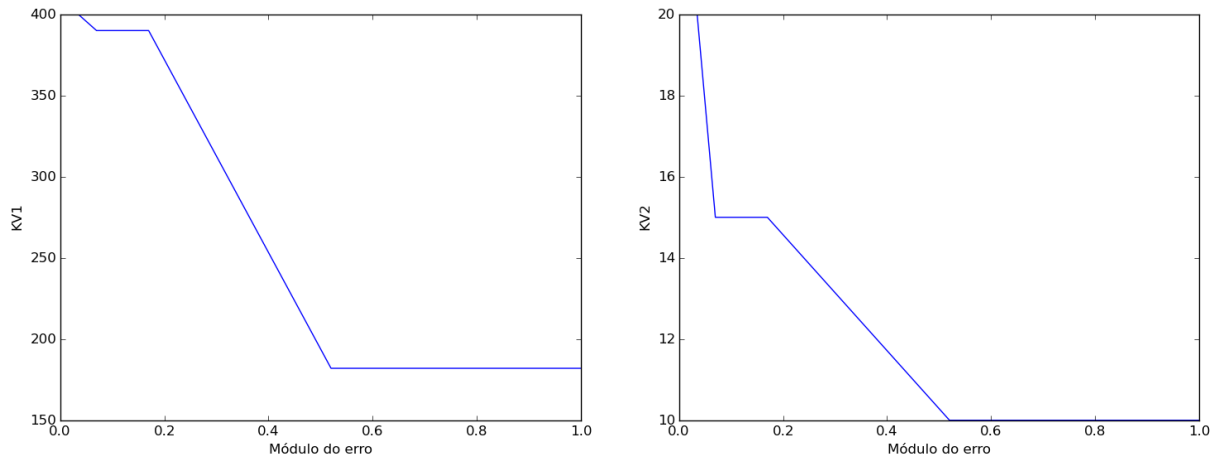
(b) Região de decisão para Junta 2.

Fonte: O autor

4.2 Resultados

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados obtidos com as simulações. Cabe ressaltar que as comparações visam analisar a capacidade dos controladores em manter o desempenho mesmo quando não operando nas regiões para as quais os controladores foram projetados. Com base nisto, os ganhos e parâmetros dos controladores foram escolhidos uma única vez (apresentados na seção anterior) e não mais modificados; ainda que a posição ou trajetória desejada se modificassem, os ganhos e parâmetros permaneceram os mesmos.

Figura 24 – Regiões de decisão fuzzy para ganho derivativo.



(a) Região de decisão para junta 1.

Fonte: O autor

(b) Região de decisão para Junta 2.

Fonte: O autor

4.2.1 Simulação 1

A primeira simulação foi a utilizada como referência para os ajustes dos ganhos, e tem como posições finais desejadas os valores de 0,05 radianos, para a junta 1 e 0,05 radianos, para a junta dois. A tabela 10 mostra um resumo dos valores obtidos nas simulações para o erro quadrático médio (EQM), erro final (EF), sobressinal (SS) e somatório total do torque em módulo (TT), ao passo que as figuras 25 até 36 mostram o comportamento de cada controlador com relação à posição, velocidade e torque na simulação 1.

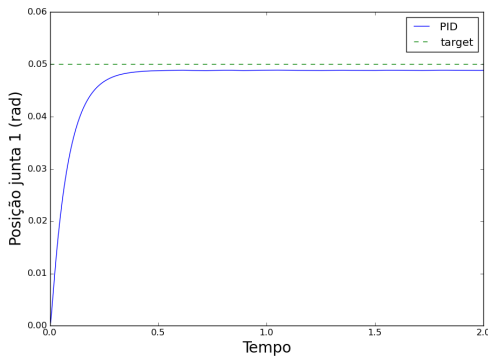
Tabela 10 – Resultados para simulação 1

	Junta	EQM (rad^2)	EF (rad)	SS (rad)	TT (Nm)
PID	1	$1,0514 \times 10^{-5}$	0,0011	0,0	30779
	2	$6,8213 \times 10^{-6}$	$-6,2538 \times 10^{-5}$	$9,15 \times 10^{-5}$	1544
PDG	1	$1,0899 \times 10^{-5}$	0,0010	0,0	31272
	2	$7,4766 \times 10^{-6}$	0,0002	0,0	1616
FUZZY	1	$1,6245 \times 10^{-5}$	0,0023	0,0	30535
	2	$5,8155 \times 10^{-6}$	0,0002	0,0	1398
GS	1	$5,9824 \times 10^{-6}$	0,0011	0,0	31566
	2	$4,6201 \times 10^{-6}$	$-8,2925 \times 10^{-5}$	0,0001	1681

Fonte: O autor

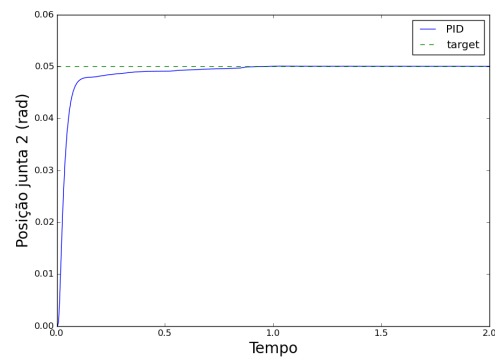
Como fica visível através dos gráficos e da tabela, nesta simulação todos os controladores tiveram um desempenho elevado, obedecendo as especificações de projeto. É possível observar uma leve vantagem do controlador GS em relação aos demais; os valores da tabela e os gráficos dos torques dos controladores também foram parecidos, o que indica que a energia gasta por eles foi semelhante. Até o presente momento, nada de novo, já que todos foram projetados para trabalhar em torno desta posição. Porém agora procede-se à mudança de posição final desejada.

Figura 25 – Gráficos de posições PID para simulação 1.



(a) Junta 1.

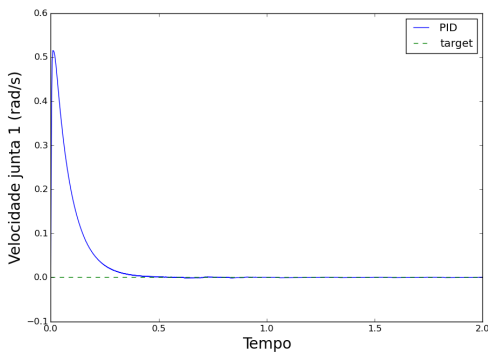
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

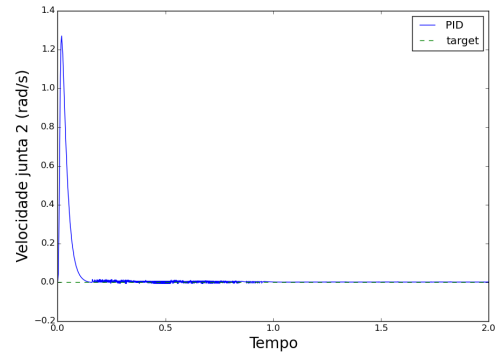
Fonte: O autor

Figura 26 – Gráficos de velocidades PID para simulação 1.



(a) Junta 1.

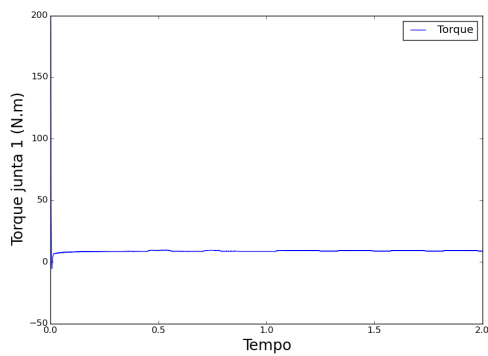
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

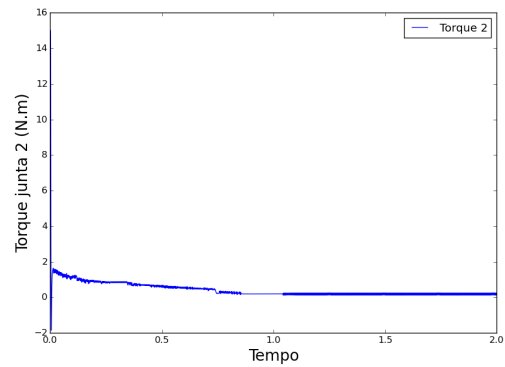
Fonte: O autor

Figura 27 – Gráficos de Torques PID para simulação 1.



(a) Junta 1.

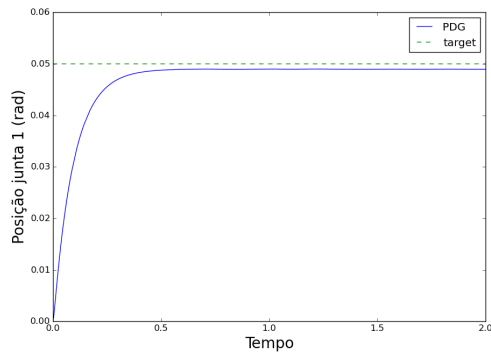
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

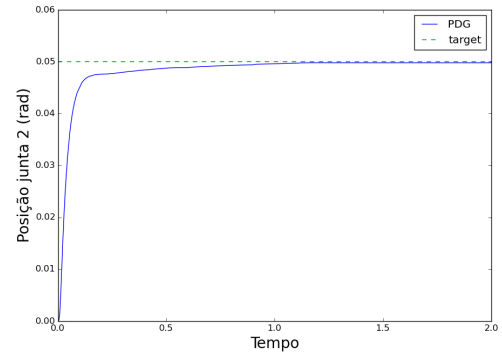
Fonte: O autor

Figura 28 – Gráficos de posições PDG para simulação 1.



(a) Junta 1.

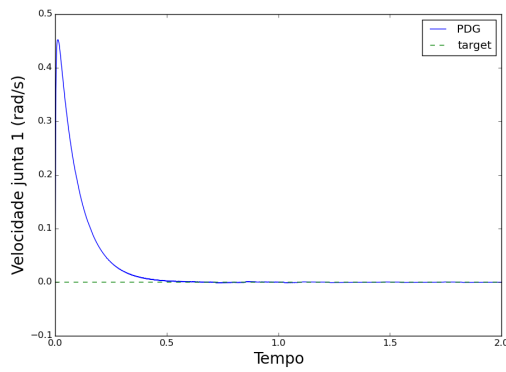
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

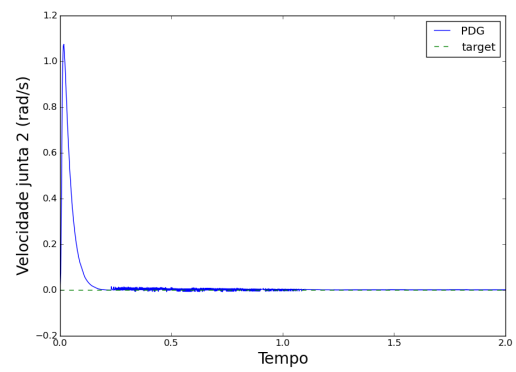
Fonte: O autor

Figura 29 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 1.



(a) Junta 1.

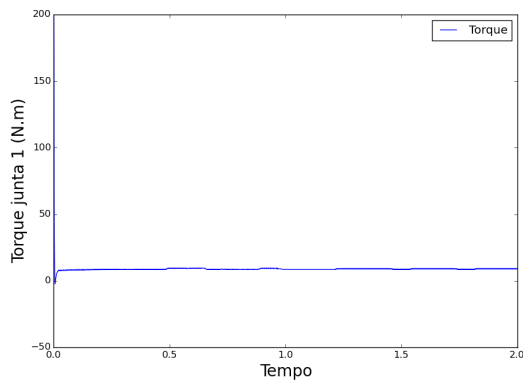
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

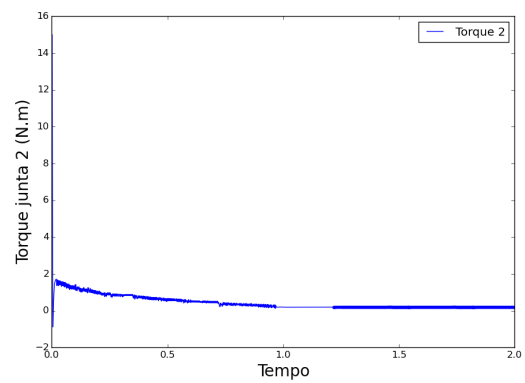
Fonte: O autor

Figura 30 – Gráficos de Torques PDG para simulação 1.



(a) Junta 1.

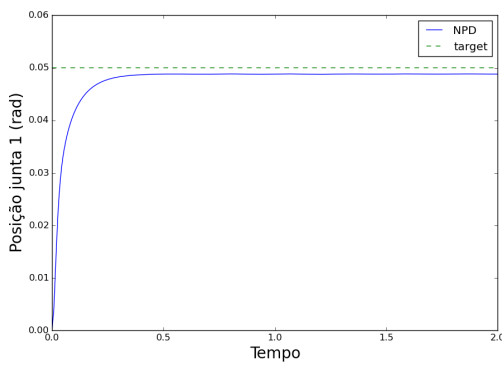
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

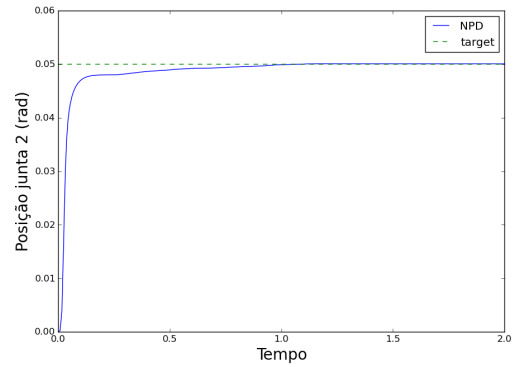
Fonte: O autor

Figura 31 – Gráficos de posições GS para simulação 1.



(a) Junta 1.

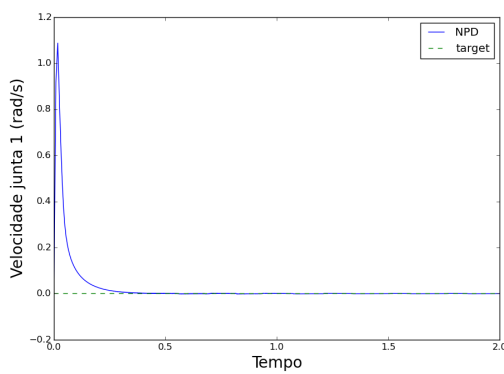
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

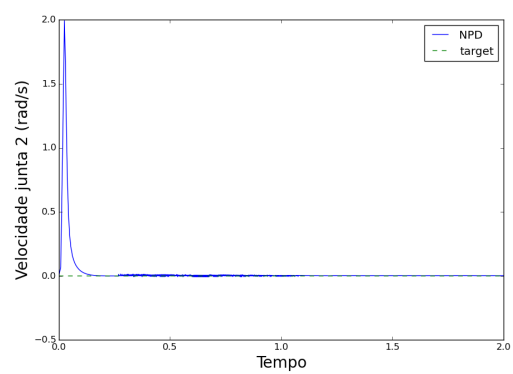
Fonte: O autor

Figura 32 – Gráficos de velocidades GS para simulação 1.



(a) Junta 1.

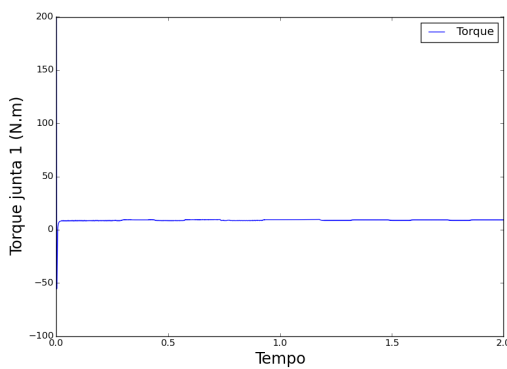
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

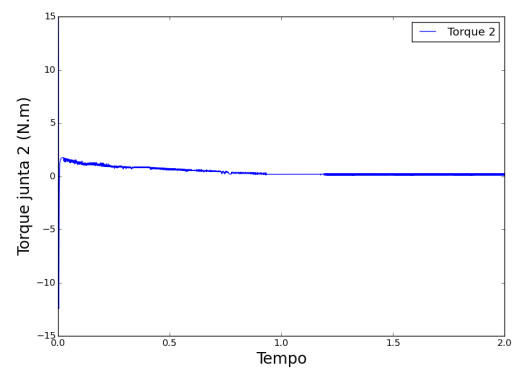
Fonte: O autor

Figura 33 – Gráficos de Torques GS para simulação 1.



(a) Junta 1.

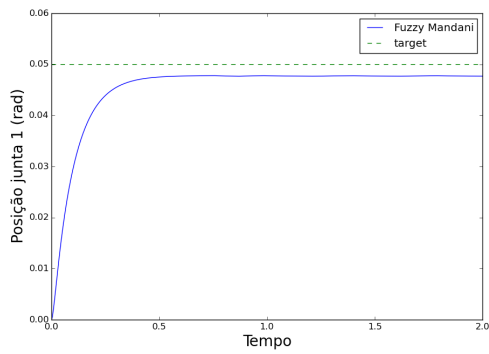
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

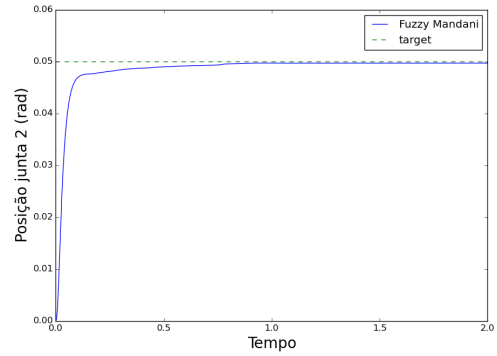
Fonte: O autor

Figura 34 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 1.



(a) Junta 1.

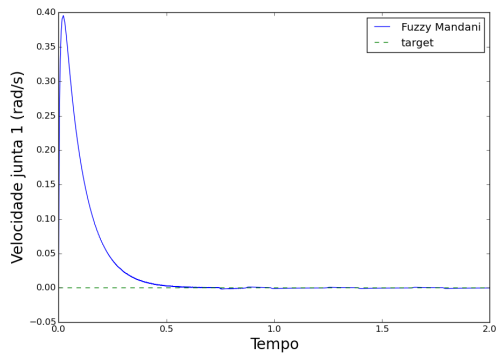
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

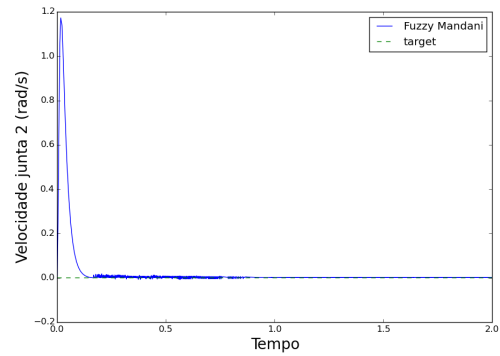
Fonte: O autor

Figura 35 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 1.



(a) Junta 1.

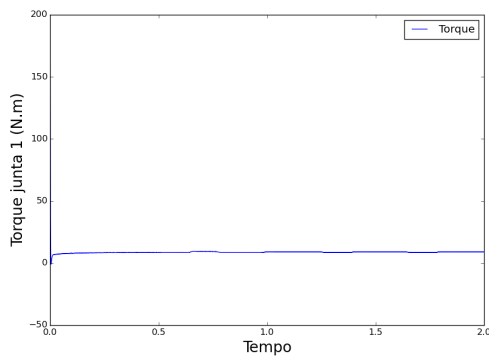
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

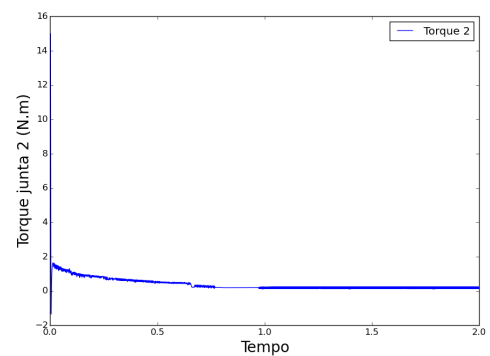
Fonte: O autor

Figura 36 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 1.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor



(b) Junta 2.

Fonte: O autor

4.2.2 Simulação 2

Na segunda simulação apresentada neste trabalho temos uma mudança de cenário; agora as posições finais desejadas para as juntas são tidas como 0,6 radianos, para a junta 1, e 0,6 radianos, para a junta 2. Lembrando novamente: embora as posições tenham sido modificadas, os parâmetros e ganhos dos controladores permanecem os mesmos apresentados anteriormente. A tabela 11 mostra um resumo dos valores obtidos na segunda simulação e as figuras 37 até 48 mostram o comportamento de cada controlador com relação a posição, velocidade e torque na simulação 2.

Tabela 11 – Resultados para simulação 2

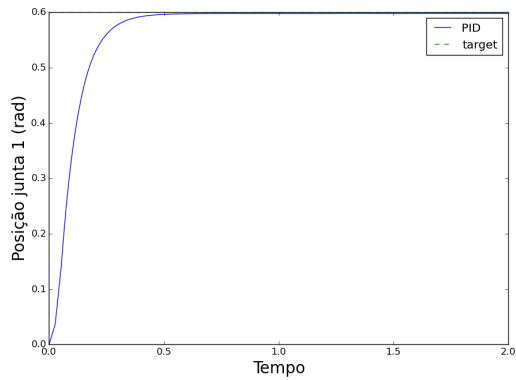
	Junta	EQM (rad^2)	EF (rad)	SS (rad)	TT (Nm)
PID	1	0,0130	0,0022	0,0	6457
	2	0,0183	-0,0078	0,0599	617
PDG	1	0,0012	0,0010	0,0	77329
	2	0,0016	0,0002	0,0	3214
FUZZY	1	0,0012	0,0057	0,0	73990
	2	0,0015	$2,2708 \times 10^{-5}$	0,0	2967
GS	1	0,0069	0,0026	0,20	10166
	2	0,0815	0,0035	1,04	1601

Fonte: O autor

Agora ficam bem claras as modificações que ocorreram nas respostas dos controladores. Diferente da simulação anterior, onde o controlador GS havia atingido um resultado um pouco melhor que os demais, aqui fica visível que ele não foi capaz de manter o desempenho; isto é evidente na figura 55, onde se vê sobressinais muito elevados (de até 1 radiano como pode ser visto na tabela) e um período de oscilação. Fica visível que seria necessário uma modificação nos parâmetros do controlador GS para atingir um desempenho melhor nesta nova posição.

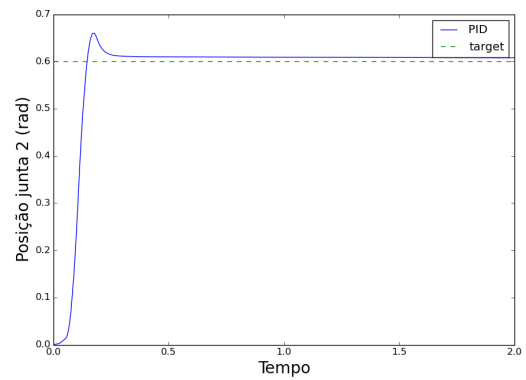
Analisando agora os controladores clássicos, temos que o controlador PID apresenta sobressinal de 0,059 radianos (cerca de 10% do valor da posição desejada) o que mostra que também seria necessário uma modificação dos ganhos do controlador para um desempenho satisfatório. Os controladores fuzzy e PDG continuam apresentando um bom desempenho mesmo com a modificação dos requisitos de operação.

Figura 37 – Gráficos de posições PID para simulação 2.



(a) Junta 1.

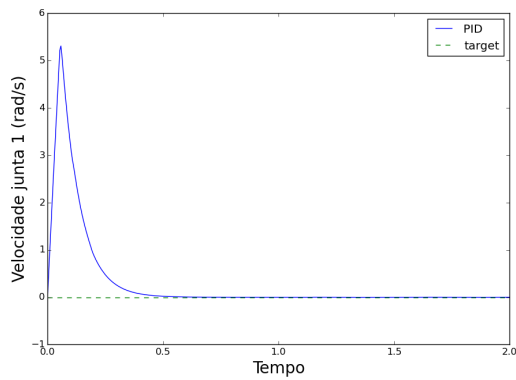
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

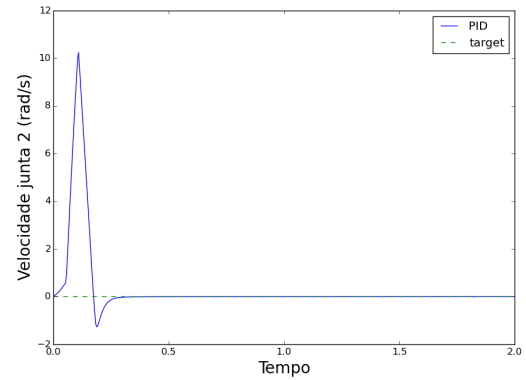
Fonte: O autor

Figura 38 – Gráficos de velocidades PID para simulação 2.



(a) Junta 1.

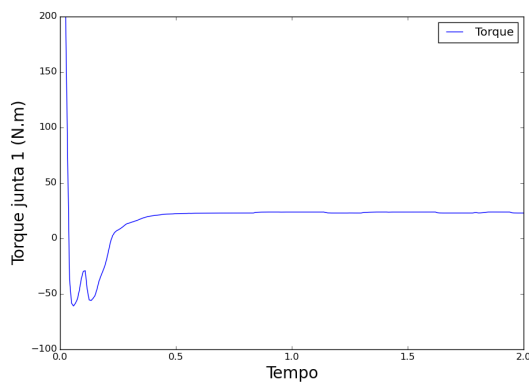
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

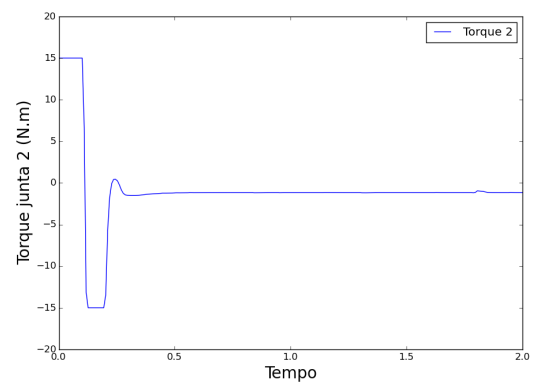
Fonte: O autor

Figura 39 – Gráficos de Torques PID para simulação 2.



(a) Junta 1.

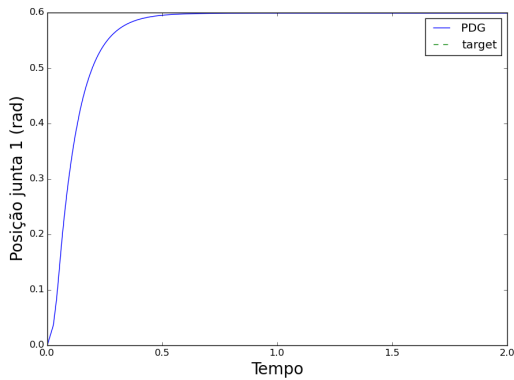
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

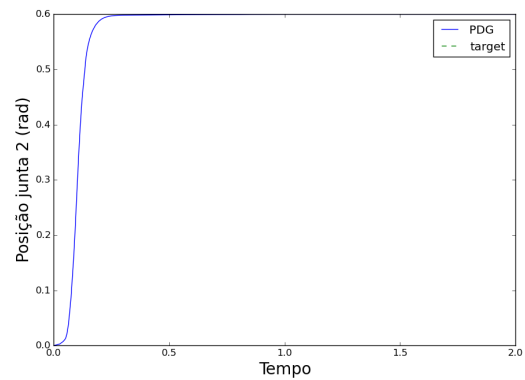
Fonte: O autor

Figura 40 – Gráficos de posições PDG para simulação 2.



(a) Junta 1.

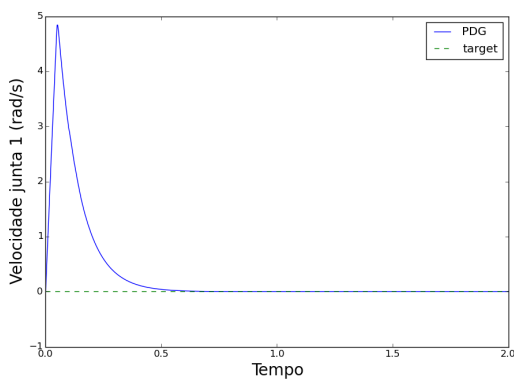
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

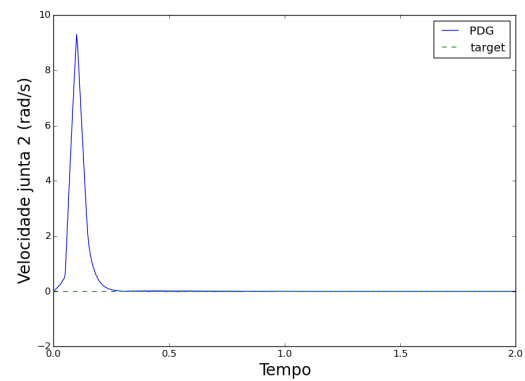
Fonte: O autor

Figura 41 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 2.



(a) Junta 1.

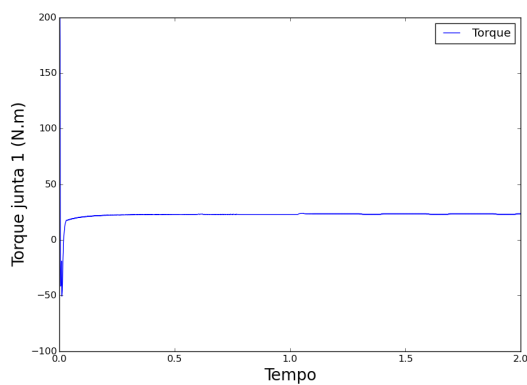
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

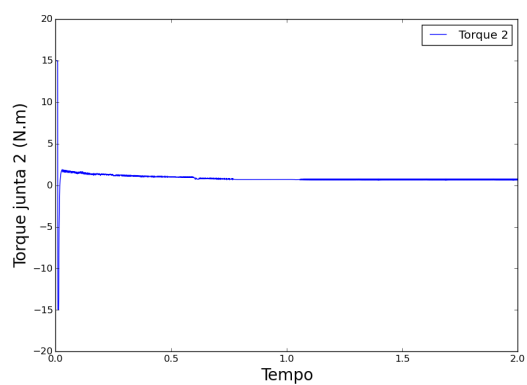
Fonte: O autor

Figura 42 – Gráficos de Torques PDG para simulação 2.



(a) Junta 1.

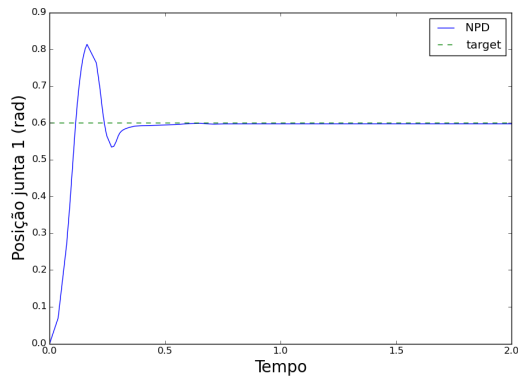
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

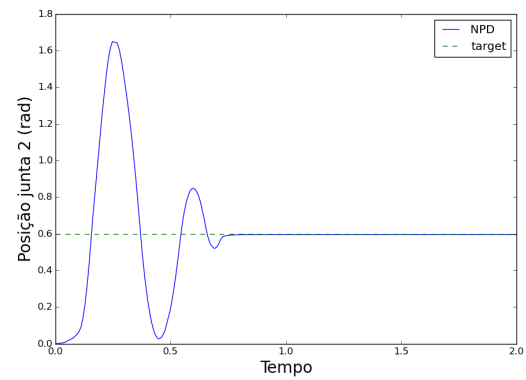
Fonte: O autor

Figura 43 – Gráficos de posições GS para simulação 2.



(a) Junta 1.

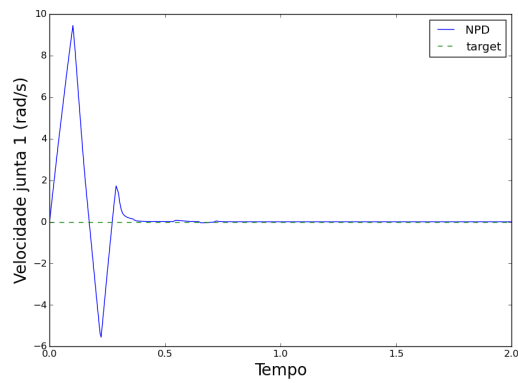
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

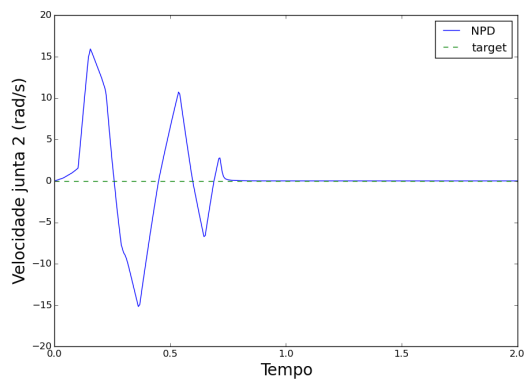
Fonte: O autor

Figura 44 – Gráficos de velocidades GS para simulação 2.



(a) Junta 1.

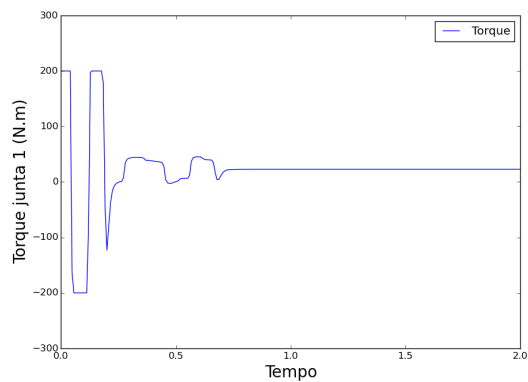
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

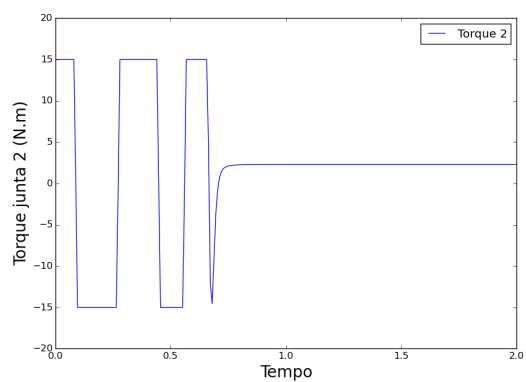
Fonte: O autor

Figura 45 – Gráficos de Torques GS para simulação 2.



(a) Junta 1.

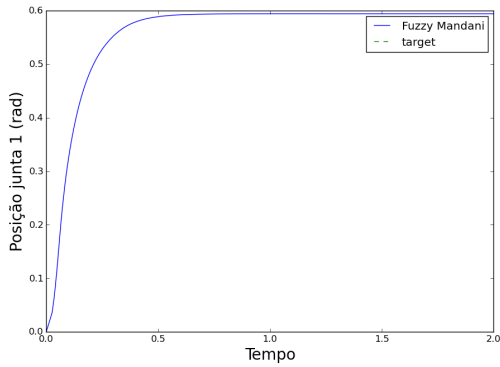
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

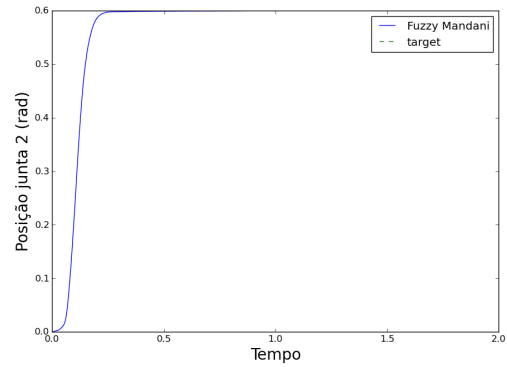
Fonte: O autor

Figura 46 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 2.



(a) Junta 1.

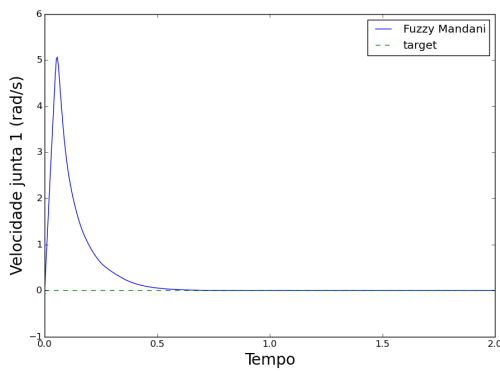
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

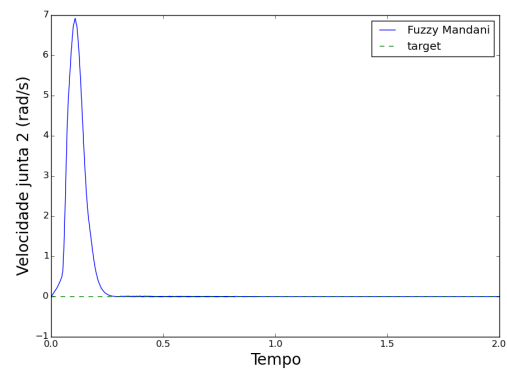
Fonte: O autor

Figura 47 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 2.



(a) Junta 1.

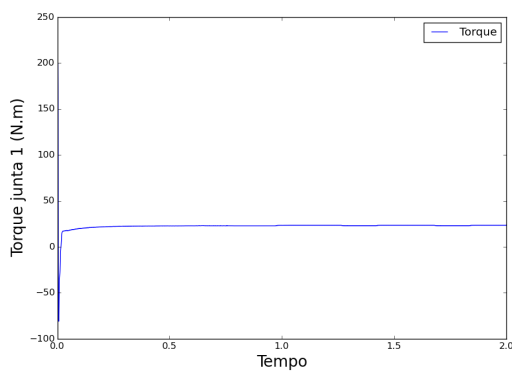
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

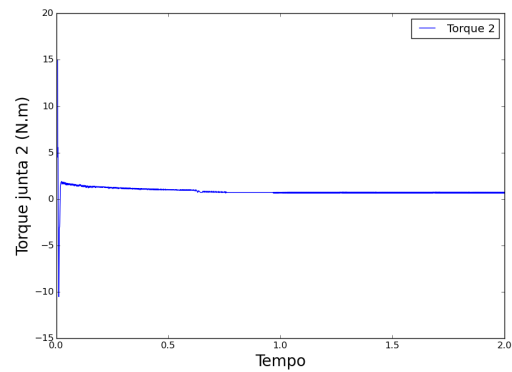
Fonte: O autor

Figura 48 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 2.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor



(b) Junta 2.

Fonte: O autor

4.2.3 Simulação 3

Nesta simulação, as posições finais desejadas para as juntas são tidas como 1,5 radianos, para a junta 1, e 1,5 radianos, para a junta 2; os ganhos permanecem os mesmos das simulações passadas. A tabela 12 mostra um resumo dos valores obtidos na simulação e as figuras 49 até 60 mostram o comportamento de cada controlador com relação a posição, velocidade e torque na simulação 3.

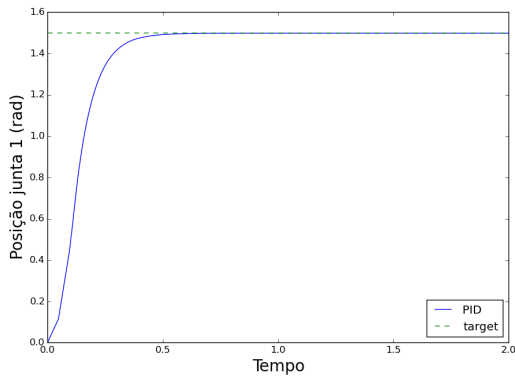
Tabela 12 – Resultados para simulação 3

	Junta	EQM (rad^2)	EF (rad)	SS (rad)	TT (Nm)
PID	1	0,0718	0,0017	0,0	9563
	2	0,1514	-0,0246	0,5314	976
PDG	1	0,0854	0,0009	0,0	9821
	2	0,1521	-0,0024	0,3	975
FUZZY	1	0,0049	0,0083	0,0	93769
	2	0,0084	-0,0038	0,003	1512
GS	1	0,0066	0,0028	0,64	64573
	2	0,0485	0,0112	2,49	1928

Fonte: O autor

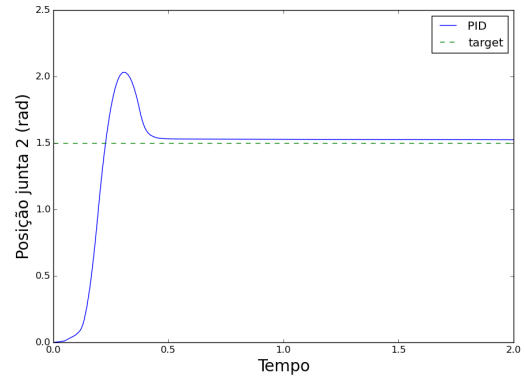
Aqui, assim como na simulação passada, fica visível o péssimo desempenho do controlador GS frente a mudança da posição desejada (figura 55). Também é possível ver sobressinais de 0,5 radianos no controlador PID, o que é equivalente a um terço do valor da posição desejada. Diferente da simulação passada, desta vez temos uma queda do desempenho do controlador PDG, onde é possível ver sobressinal na trajetória e um crescimento no erro quadrático médio. O controlador fuzzy mantém um desempenho satisfatório mesmo na nova mudança de posição, o que mostra que ele apresenta uma grande capacidade de adaptação.

Figura 49 – Gráficos de posições PID para simulação 3.



(a) Junta 1.

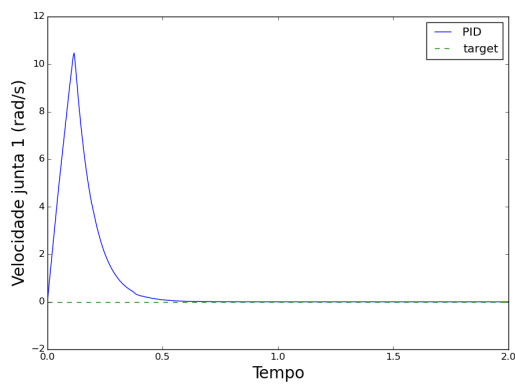
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

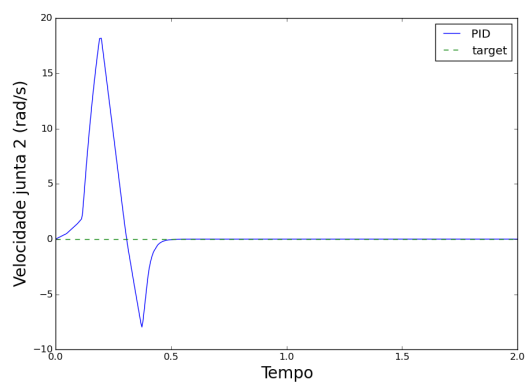
Fonte: O autor

Figura 50 – Gráficos de velocidades PID para simulação 3.



(a) Junta 1.

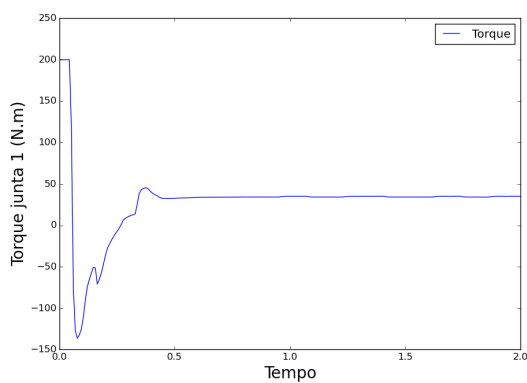
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

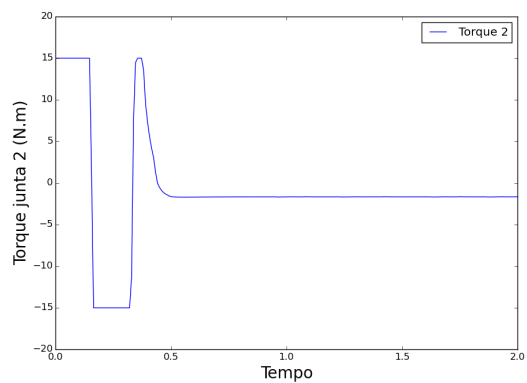
Fonte: O autor

Figura 51 – Gráficos de Torques PID para simulação 3.



(a) Junta 1.

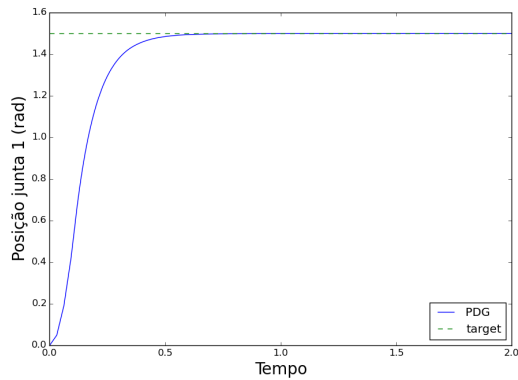
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

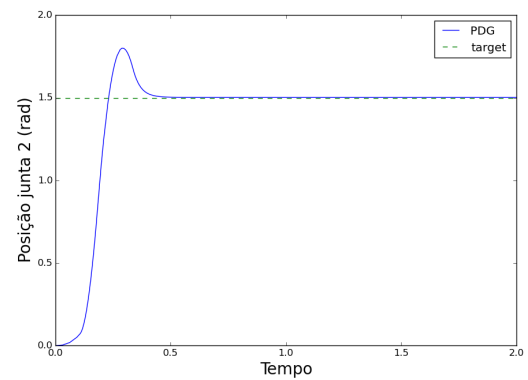
Fonte: O autor

Figura 52 – Gráficos de posições PDG para simulação 3.



(a) Junta 1.

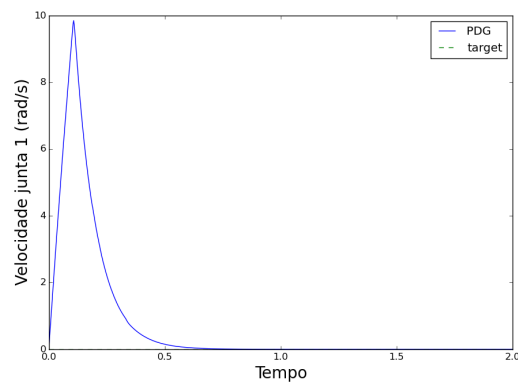
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

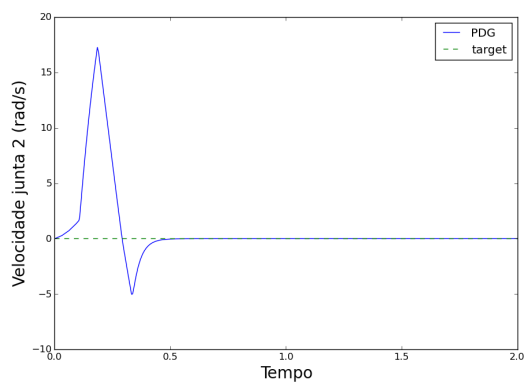
Fonte: O autor

Figura 53 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 3.



(a) Junta 1.

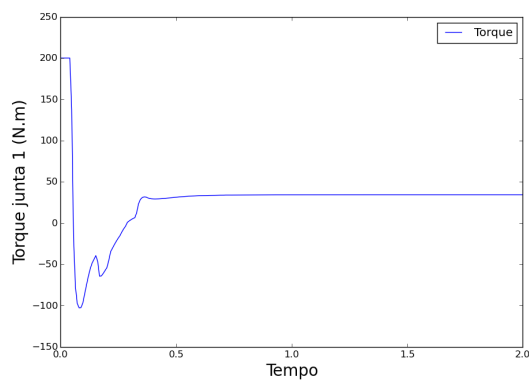
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

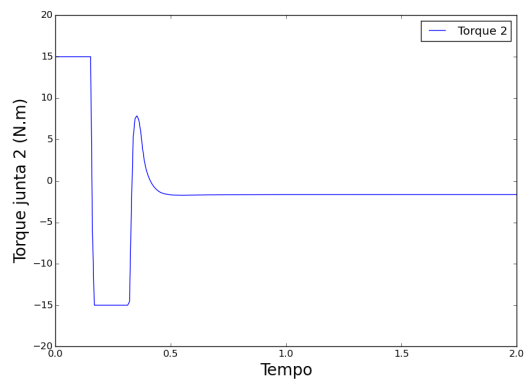
Fonte: O autor

Figura 54 – Gráficos de Torques PDG para simulação 3.



(a) Junta 1.

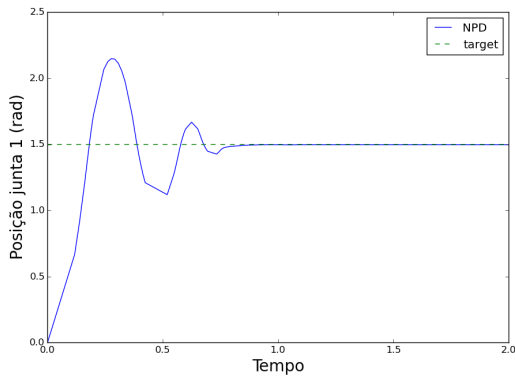
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

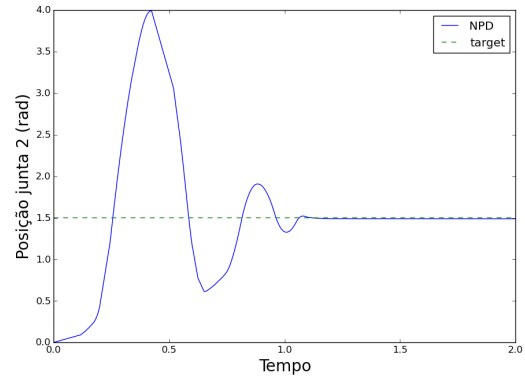
Fonte: O autor

Figura 55 – Gráficos de posições GS para simulação 3.



(a) Junta 1.

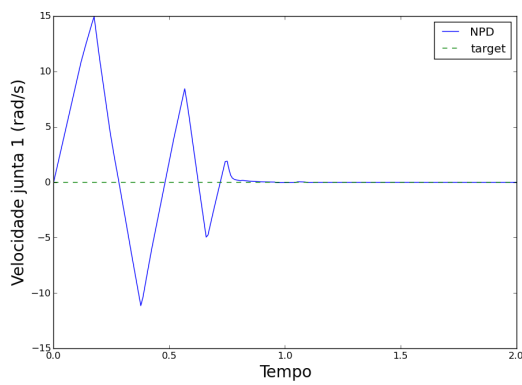
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

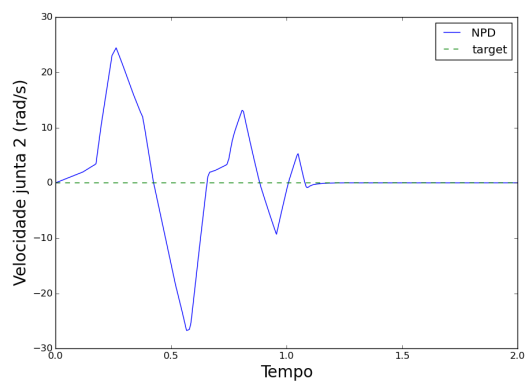
Fonte: O autor

Figura 56 – Gráficos de velocidades GS para simulação 3.



(a) Junta 1.

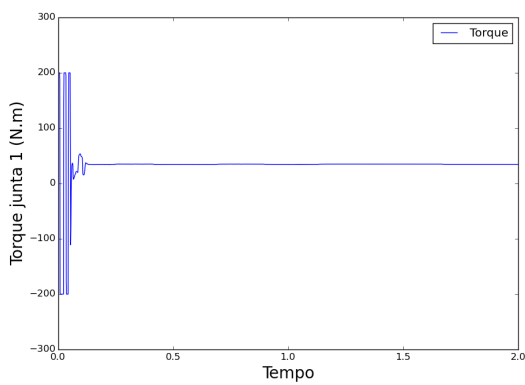
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

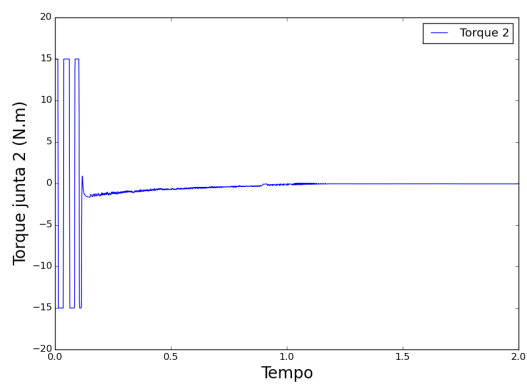
Fonte: O autor

Figura 57 – Gráficos de Torques GS para simulação 3.



(a) Junta 1.

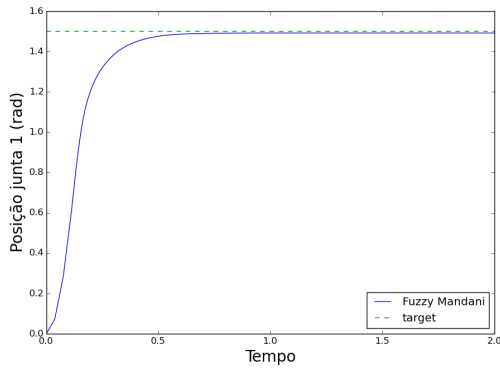
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

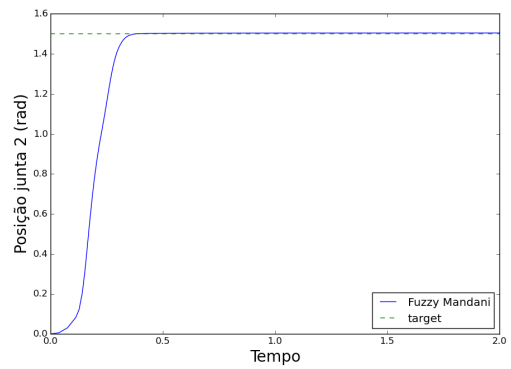
Fonte: O autor

Figura 58 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 3.



(a) Junta 1.

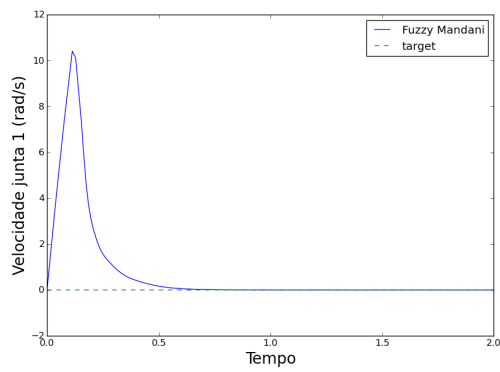
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

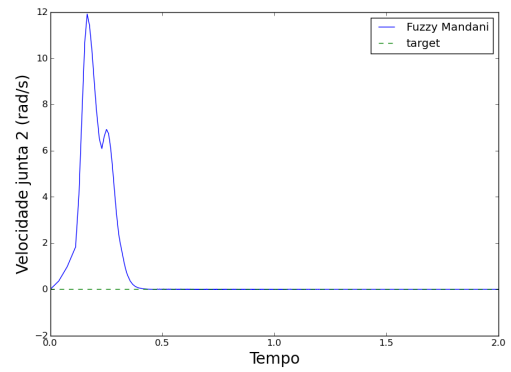
Fonte: O autor

Figura 59 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 3.



(a) Junta 1.

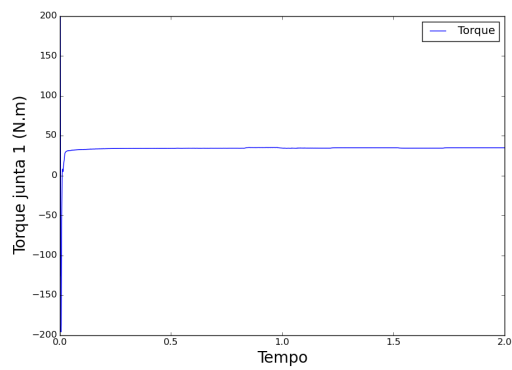
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

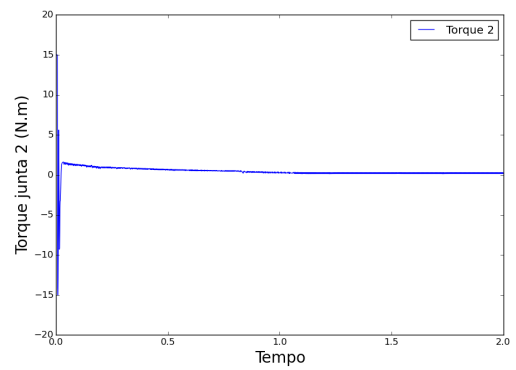
Fonte: O autor

Figura 60 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 3.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor



(b) Junta 2.

Fonte: O autor

4.2.4 Simulação 4

Das simulações anteriores ficou visível a capacidade do controlador fuzzy de manter um desempenho elevado em comparação aos demais controladores quando submetidos a diferentes posições desejadas. Partindo agora para o caso onde se deseja seguir uma trajetória e não apenas um valor final de posição, veremos agora o desempenho dos controladores em uma situação onde a trajetória é uma função do tempo t porém, continuando com os mesmos ganhos das situações anteriores. No caso, a trajetória desejada para a junta 1 é da forma:

$$q_1 = 2\sin(t) + 3\sin(2t) + \cos(3t)$$

Já a trajetória da junta 2 é da forma:

$$q_2 = 2\sin(t) + 3\sin(2t) + \cos(3t) + 2$$

A tabela 13 mostra um resumo dos valores obtidos na simulação para o erro quadrático médio(EQM), erro final(EF), pico do erro(PE) e somatório total do módulo do torque(TT) e as figuras 61 até 72 mostram o comportamento de cada controlador com relação a posição, velocidade e torque na simulação 4.

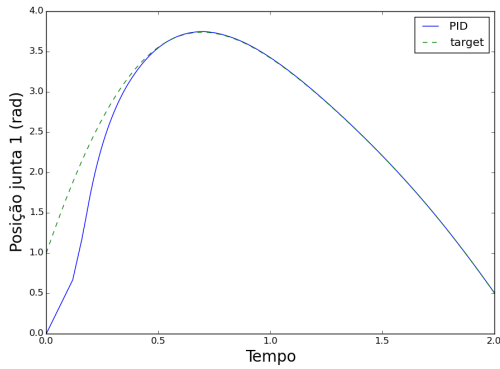
Tabela 13 – Resultados para simulação 4

	Junta	EQM (rad^2)	PE (rad)	TT (Nm)
PID	1	0,0459	0,0078	6753
	2	1,7884	1,8207	1710
PDG	1	0,0521	0,0005	6982
	2	1,6585	1,3062	1735
FUZZY	1	0,0406	0,005	5714
	2	1,1855	0,023	842
GS	1	0,0379	0,67	10709
	2	2,0662	3,11	2335

Fonte: O autor

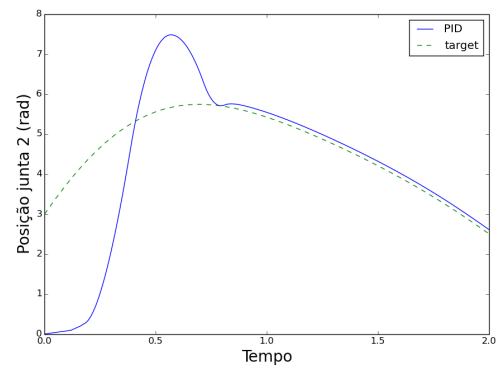
Através dos gráficos e figuras fica claro que os controladores GS, PID e PDG apresentaram trechos de sobressinal elevado na tentativa de seguir as trajetórias especificadas, o que mostra que haveria a necessidade de escolher novos ganhos e parâmetros para estes. Já o controlador fuzzy conseguiu claramente seguir a trajetória, apresentando um sobressinal minúsculo e, além de tudo, apresentou menores intervalos de tempo de permanência no torque máximo: isto significa que os motores passam menos tempo em uma condição de esforço máximo, o que acarreta uma maior durabilidade.

Figura 61 – Gráficos de posições PID para simulação 4.



(a) Junta 1.

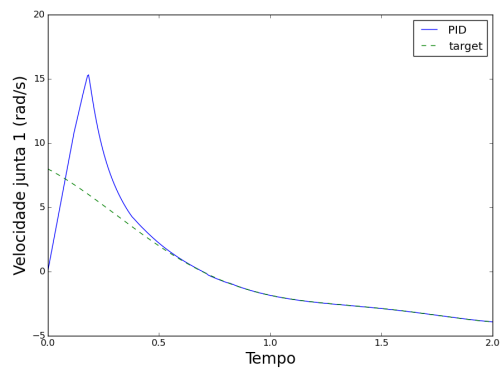
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

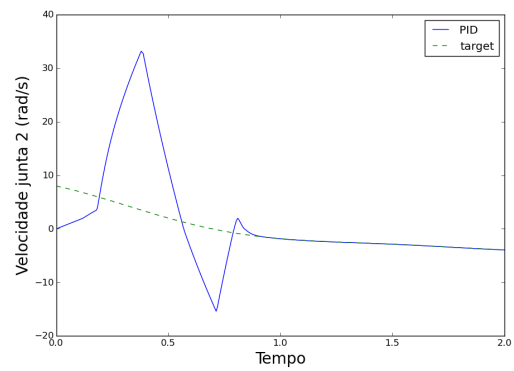
Fonte: O autor

Figura 62 – Gráficos de velocidades PID para simulação 4.



(a) Junta 1.

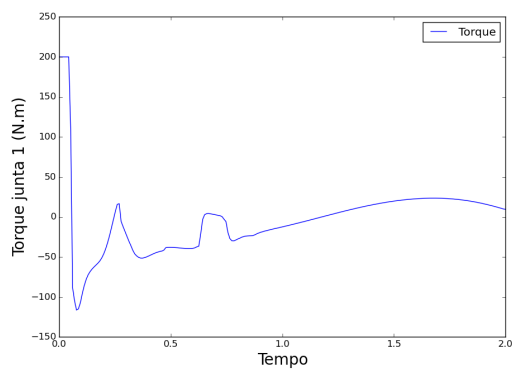
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

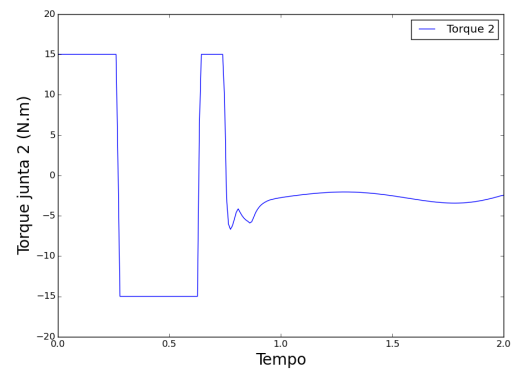
Fonte: O autor

Figura 63 – Gráficos de Torques PID para simulação 4.



(a) Junta 1.

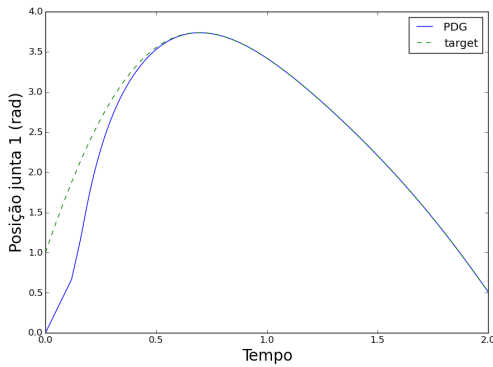
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

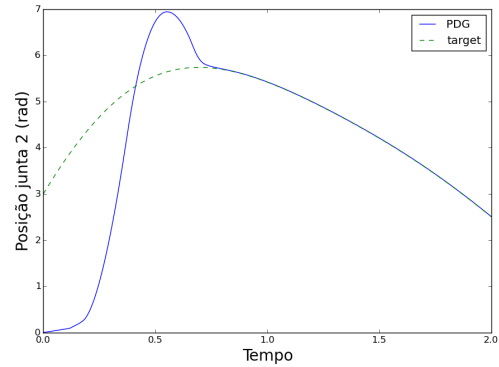
Fonte: O autor

Figura 64 – Gráficos de posições PDG para simulação 4.



(a) Junta 1.

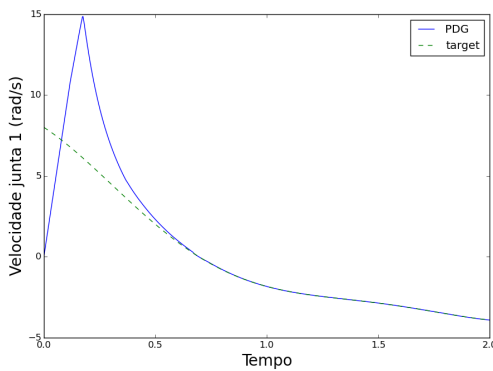
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

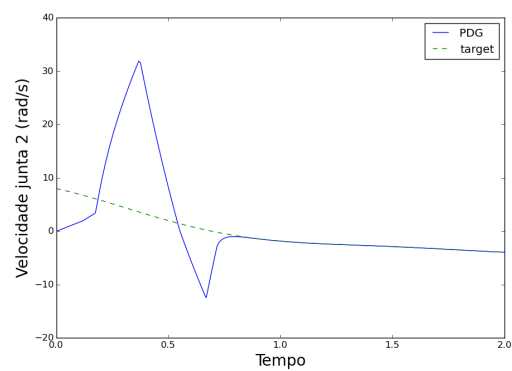
Fonte: O autor

Figura 65 – Gráficos de velocidades PDG para simulação 4.



(a) Junta 1.

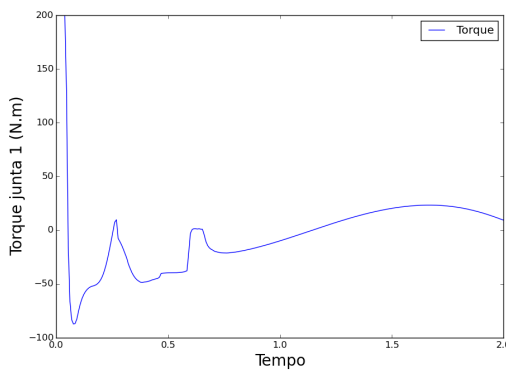
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

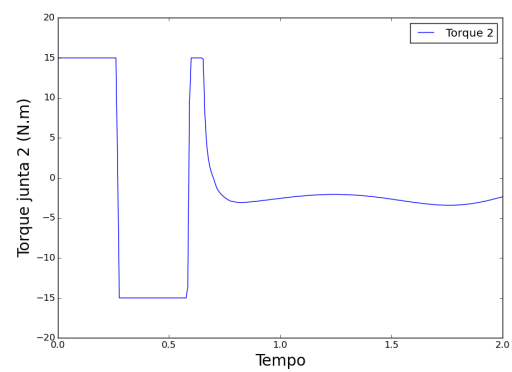
Fonte: O autor

Figura 66 – Gráficos de Torques PDG para simulação 4.



(a) Junta 1.

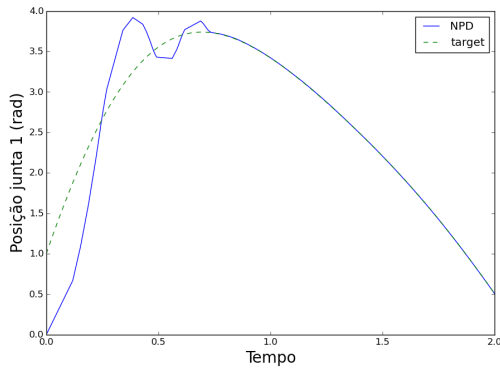
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

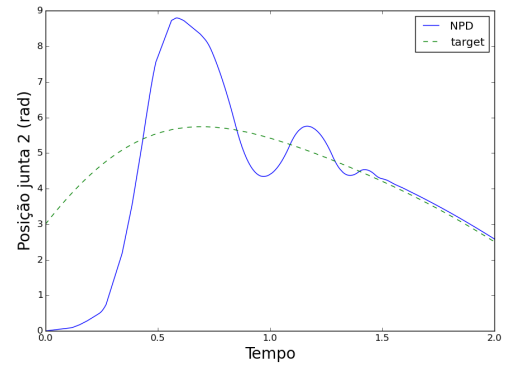
Fonte: O autor

Figura 67 – Gráficos de posições GS para simulação 4.



(a) Junta 1.

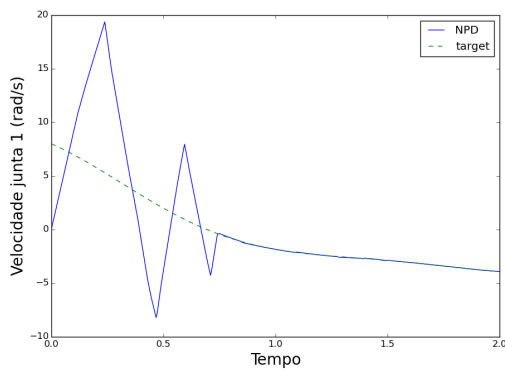
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

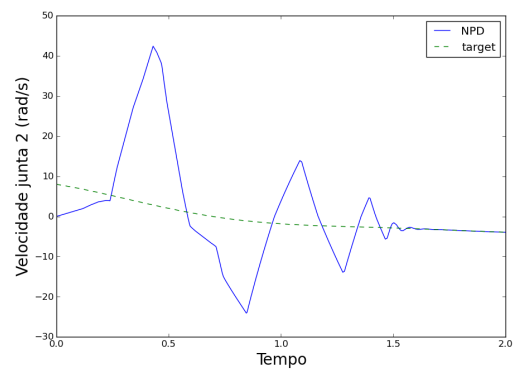
Fonte: O autor

Figura 68 – Gráficos de velocidades GS para simulação 4.



(a) Junta 1.

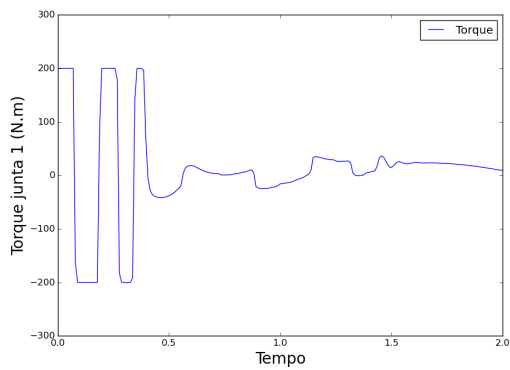
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

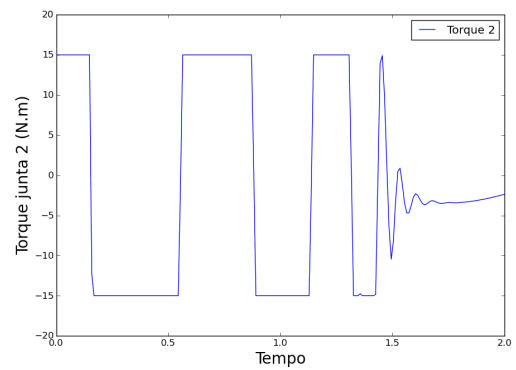
Fonte: O autor

Figura 69 – Gráficos de Torques GS para simulação 4.



(a) Junta 1.

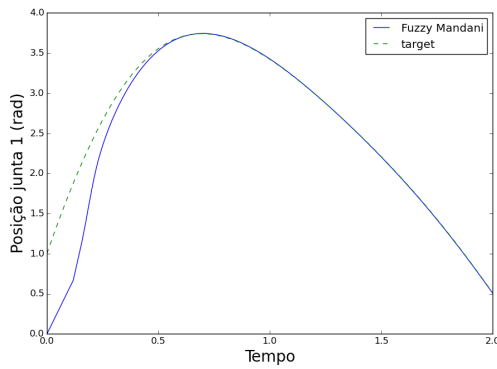
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

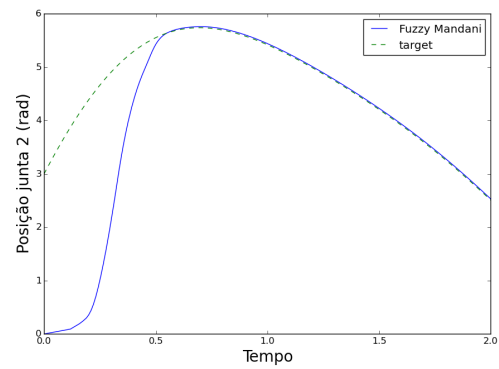
Fonte: O autor

Figura 70 – Gráficos de posições fuzzy Mandani para simulação 4.



(a) Junta 1.

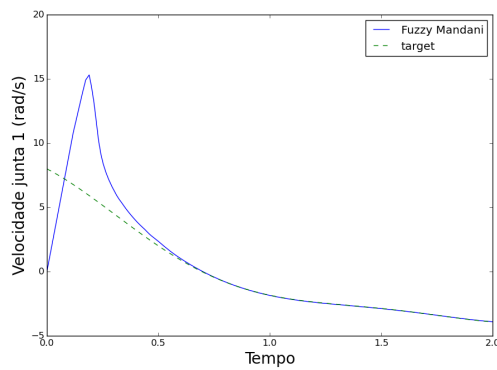
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

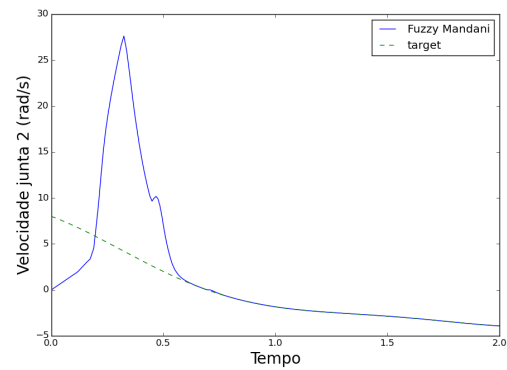
Fonte: O autor

Figura 71 – Gráficos de velocidades fuzzy Mandani para simulação 4.



(a) Junta 1.

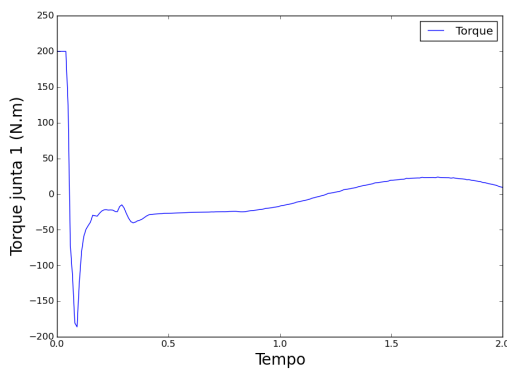
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

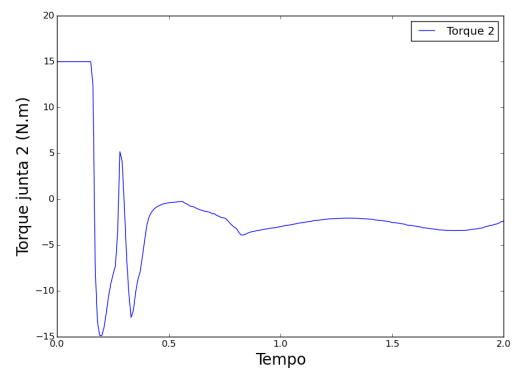
Fonte: O autor

Figura 72 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para simulação 4.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor



(b) Junta 2.

Fonte: O autor

4.3 Análise de desempenho fuzzy

Dos resultados das simulações foi possível ver o melhor desempenho do controlador fuzzy em se adaptar a diferentes tarefas sem a necessidade de modificações dos parâmetros dos conjuntos. Em todas as simulações, porém, considera-se somente a dinâmica do manipulador. Será que o controlador consegue manter o desempenho mesmo em situações em que também haja modificações do meio ou ação de perturbações? Esta seção procura simular algumas situações onde ocorrem estas mudanças.

4.3.1 Efeito da Gravidade

O primeiro caso a ser analisado será a capacidade do controlador responder a mudanças no meio; no caso a mudança aqui simulada será uma modificação da aceleração da gravidade. Modificações no valor da aceleração gravitacional são comuns em tarefas espaciais, assim o controlador apresentar uma boa capacidade de operar mesmo com estas mudanças mostra que ele pode ser uma boa escolha para trabalhos na área espacial. A trajetória simulada será a mesma utilizada na simulação quatro, porém agora considerando uma aceleração gravitacional maior. Foram testados diferentes valores para a aceleração gravitacional, dentre estes o maior valor que o controlador conseguiu suportar continuando a seguir a trajetória de forma satisfatória foi cinco vezes a aceleração gravitacional da Terra, é este resultado que é apresentado aqui buscando mostrar que mesmo com um valor elevado o controlador manteve um grau de desempenho satisfatório. A tabela 14 mostra um resumo dos valores obtidos na simulação com gravidade da terra e na simulação com a gravidade cinco vezes a da terra, e as figuras 73 até 74 mostram os gráficos de posição e velocidade para a gravidade modificada, já as figuras 75 e 76 mostram os torque na gravidade da terra e na gravidade modificada.

Tabela 14 – Resultados para simulação da gravidade

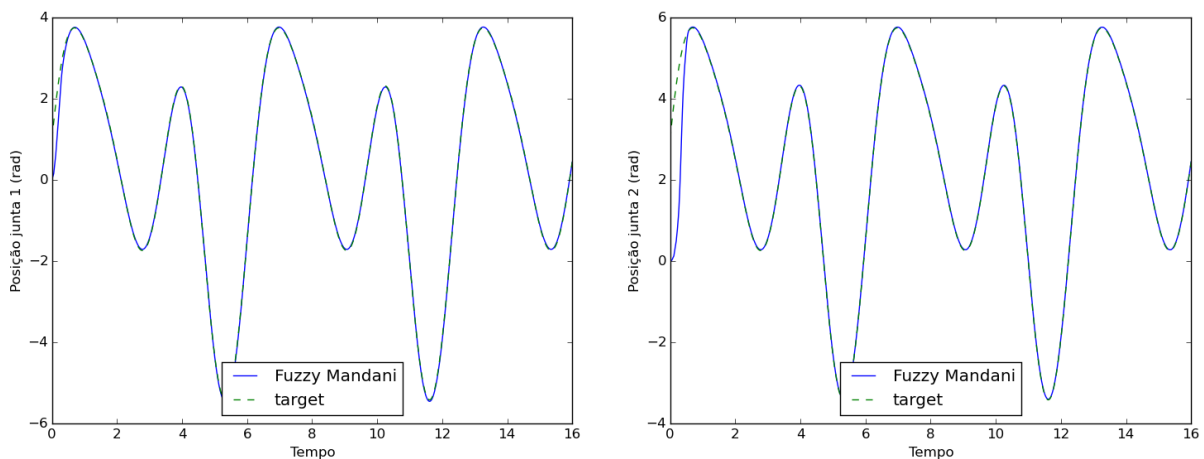
	Junta	EQM (rad^2)	PE (rad)	TT (Nm)
FUZZY 1G	1	0,0052	0,011	7,10
	2	0,1516	0,026	-0,27
FUZZY 5G	1	0,0066	0,0318	7,21
	2	0,1331	0,0305	-0,48

Fonte: O autor

Como é possível ver nos gráficos e tabelas, o controlador respondeu muito bem até o valor de cinco vezes a gravidade da Terra; os valores de pico do erro e erro quadrático médio foram muito próximos dos valores em gravidade normal. A grande diferença é vista nos torques; para o valor de gravidade maior, os torques são bem maiores (claramente visto nas figuras) justamente devido ao maior esforço necessário para realizar a movimentação. O resultado mostrado aqui não indica que o controlador suporta cinco vezes a gravidade terrestre para qualquer trajetória; dependendo da movimentação requerida esse limite

gravitacional pode ser menor, porém este resultado serve para demonstrar a capacidade que controlador ajustado por lógica fuzzy tem de manter um desempenho alto mesmo em mudanças gravitacionais o que revela potencial para aplicações espaciais. Cabe destacar que a lei de controle aqui não inclui termos gravitacionais assim como o controlador PDG, ou seja, o controlador fuzzy está tendo este resultado mesmo sem ter termos gravitacionais dentro de sua lei de controle.

Figura 73 – Gráficos de Posições fuzzy Mandani com 5 vezes a gravidade da Terra.



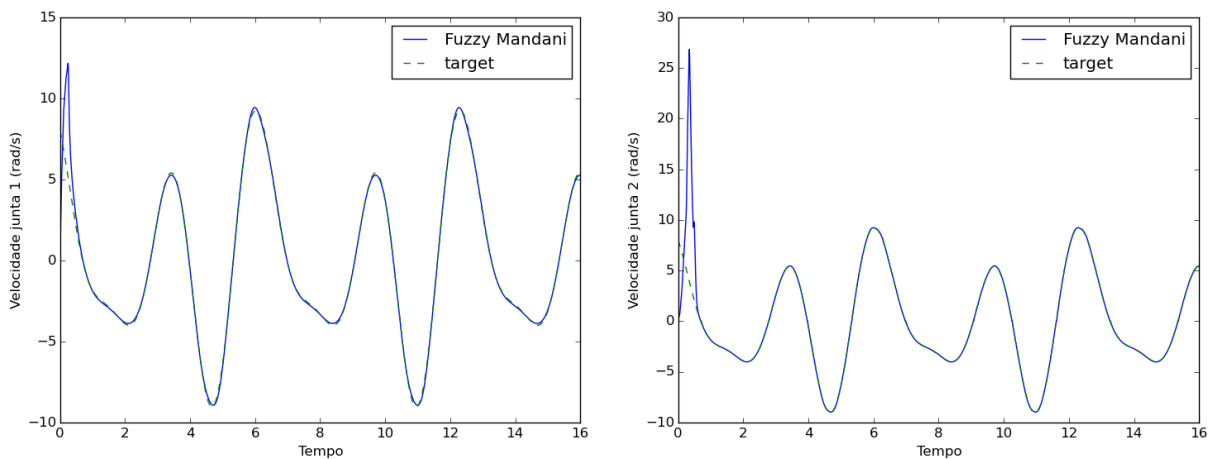
(a) Junta 1.

Fonte: O autor

(b) Junta 2.

Fonte: O autor

Figura 74 – Gráficos de Velocidades fuzzy Mandani com 5 vezes a gravidade da Terra.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor

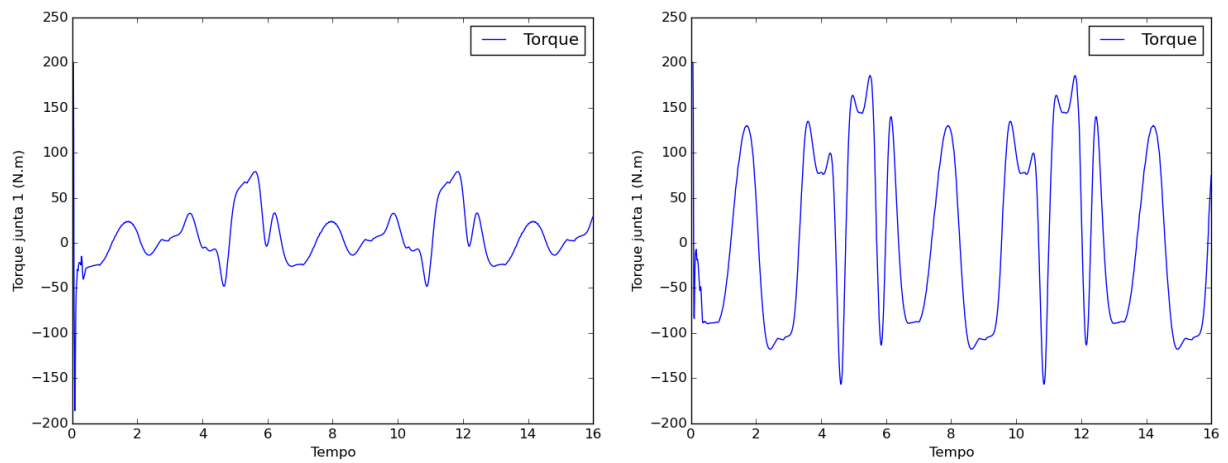
(b) Junta 2.

Fonte: O autor

4.3.2 Efeito da Perturbação

Considera-se agora o caso em que temos perturbações agindo no sistema. As perturbações foram escolhidas de forma que o seu valor máximo fosse metade do valor

Figura 75 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 1.



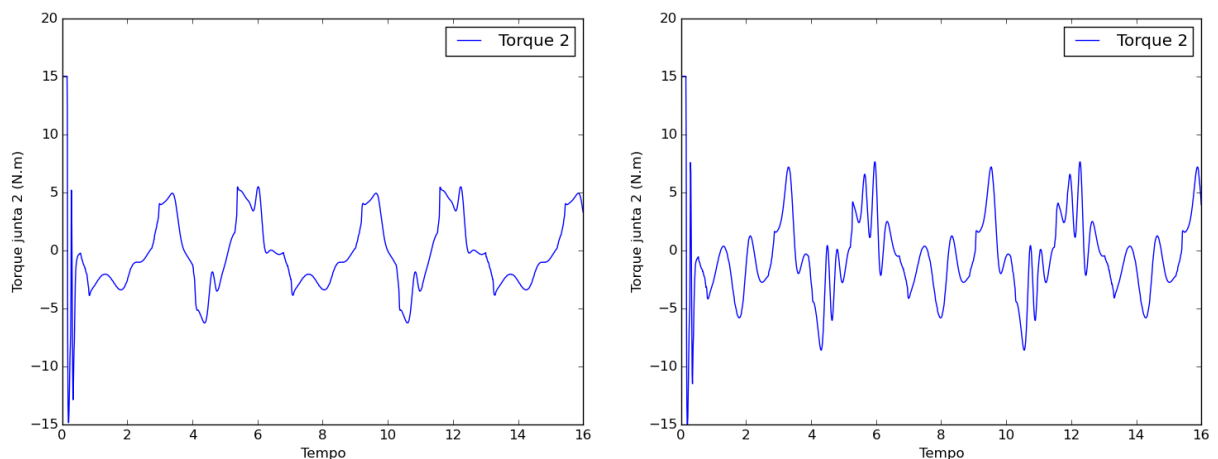
(a) Gravidade da Terra.

Fonte: O autor

(b) Cinco vezes a gravidade da Terra.

Fonte: O autor

Figura 76 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 2.



(a) Gravidade da Terra.

Fonte: O autor

(b) Cinco vezes a gravidade da Terra.

Fonte: O autor

máximo de torque suportado pelos motores, valor este que normalmente é o máximo utilizado para testes de manipuladores de acordo com as normas, esta perturbação tem um valor elevado para o sistema em questão. Para mostrar a capacidade do controlador resistir a perturbações oscilatórias, fez-se com que os valores escolhidos oscilassem no decorrer do tempo t . A perturbação para a junta 1 segue a equação:

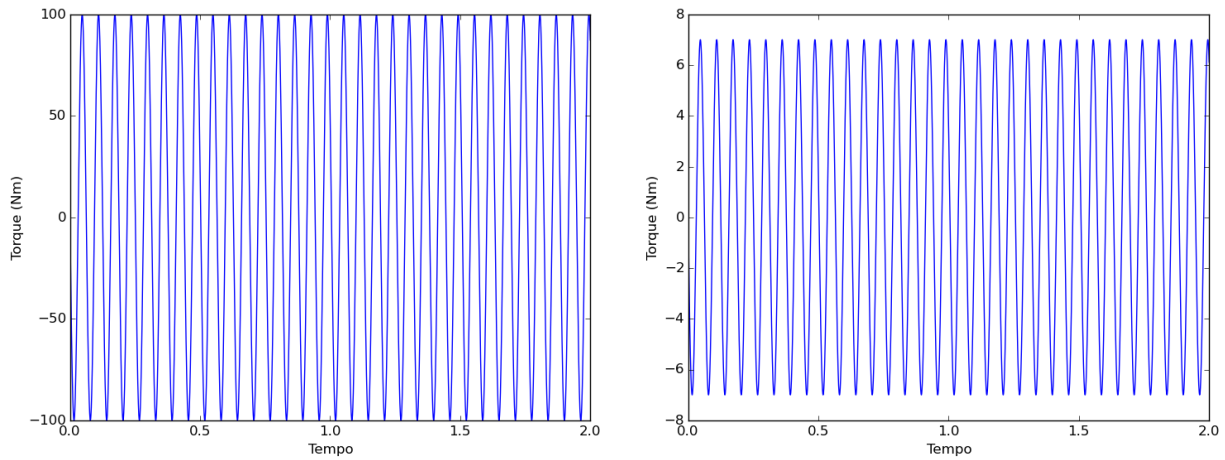
$$P_1 = -100\sin(100t)$$

E, para a junta 2, a equação:

$$P_2 = -7\sin(100t)$$

O gráfico destas perturbações pode ser visto na figura 77. A trajetória simulada

Figura 77 – Gráficos de perturbações.



(a) Junta 1.

Fonte: O autor

(b) Junta 2.

Fonte: O autor

continua sendo a mesma utilizada na simulação quatro. A tabela 15 mostra um resumo dos resultados da simulação, e as figuras 78 e 80 mostram os gráficos de posição e velocidade com ação da perturbação. As figuras 82 e 83, por sua vez, mostram os torques com e sem a ação da perturbação. As figuras 79 e 81 mostram os erros de posição e velocidade do sistema sob perturbação.

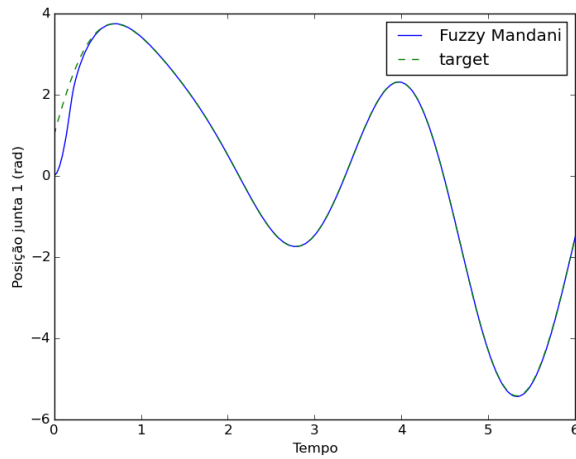
Tabela 15 – Resultados para simulação da perturbação

	Junta	EQM (rad^2)	PE (rad)	TT (Nm)
FUZZY	1	0,0139	0,0112	8,31
	2	0,4068	0,0266	-0,32
FUZZY + perturbação	1	0,0145	0,0134	9,11
	2	0,3628	0,0292	-0,28

Fonte: O autor

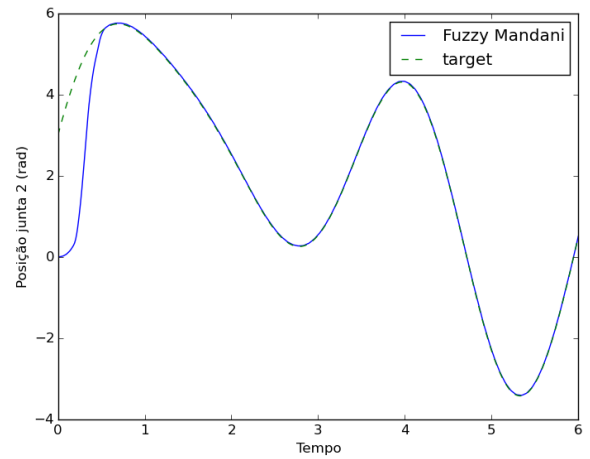
Como pode ser visto, o controlador novamente consegue seguir a trajetória desejada; quando comparado com a situação normal, vê-se que é pouca a diferença de erros e sobressinais; a grande diferença está no valor do torque que, devido a oscilação da perturbação acaba sendo oscilatório também e acarreta um maior consumo de energia. Outra coisa importante a ser observada são os gráficos de erro de posição e velocidade: embora ambos apresentem oscilação, eles oscilam muito próximo do valor de erro zero. Com base nisto é possível ver que o controlador também é capaz de suportar perturbações oscilatórias e de valor elevado.

Figura 78 – Gráficos de Posições com ação das perturbações.



(a) Junta 1.

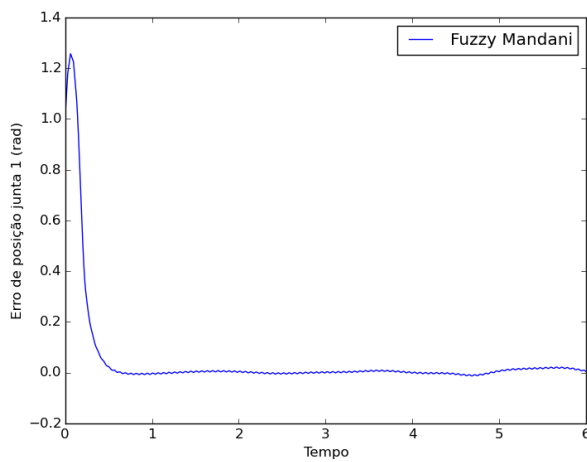
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

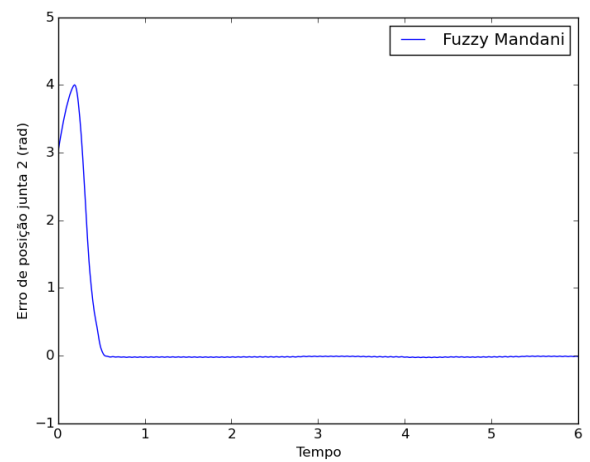
Fonte: O autor

Figura 79 – Gráficos de erro de posições com ação das perturbações.



(a) Junta 1.

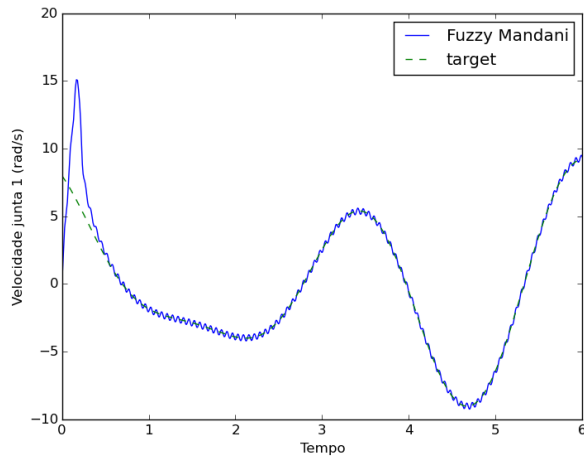
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

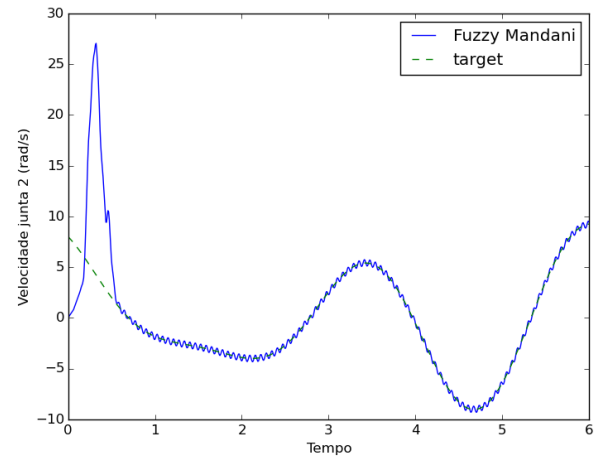
Fonte: O autor

Figura 80 – Gráficos de Velocidades com ação das perturbações.



(a) Junta 1.

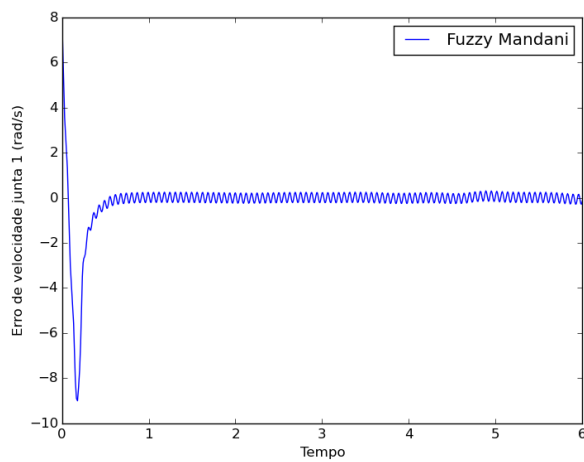
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

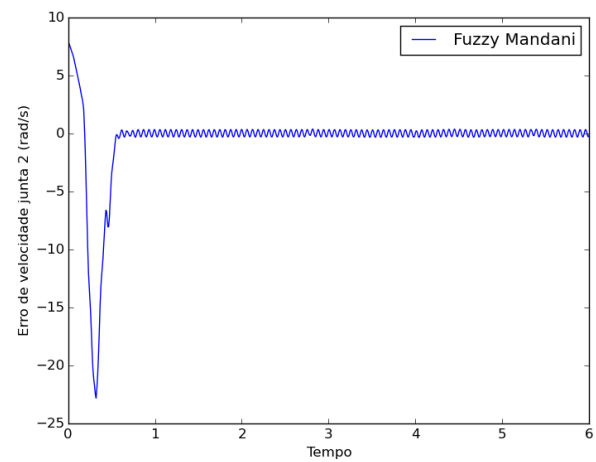
Fonte: O autor

Figura 81 – Gráficos de erro de velocidade com ação das perturbações.



(a) Junta 1.

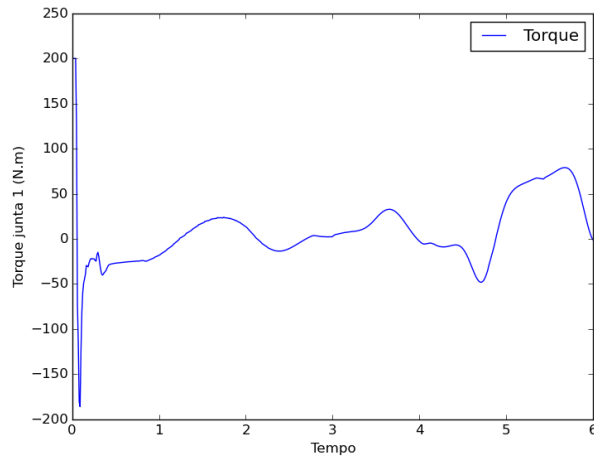
Fonte: O autor



(b) Junta 2.

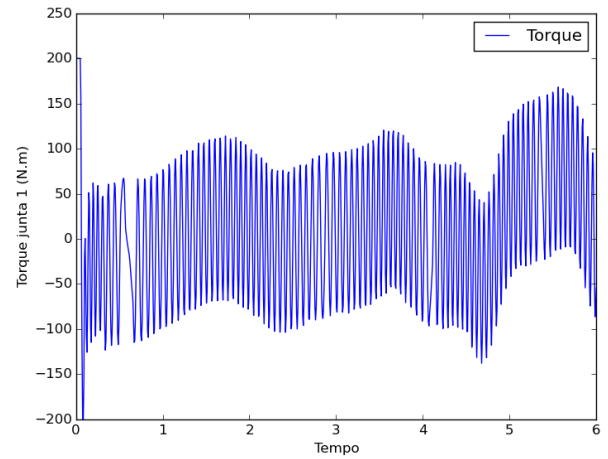
Fonte: O autor

Figura 82 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 1.



(a) Sem perturbação.

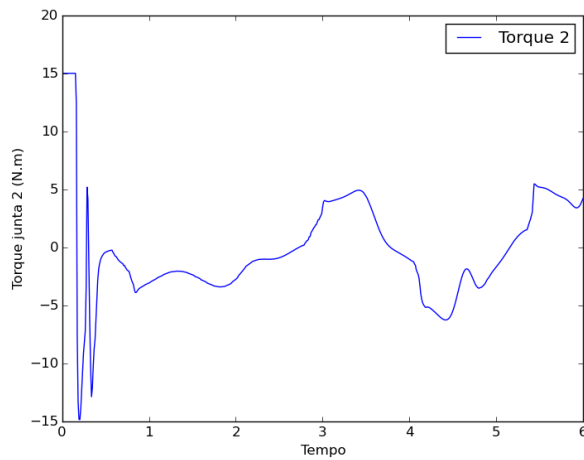
Fonte: O autor



(b) Com perturbação.

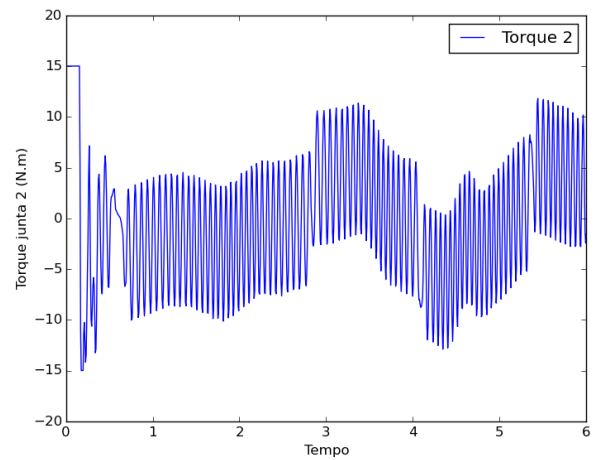
Fonte: O autor

Figura 83 – Gráficos de Torques fuzzy Mandani para junta 2.



(a) Sem perturbação.

Fonte: O autor



(b) Com perturbação.

Fonte: O autor

5 Conclusões

5.1 Introdução

Nesta dissertação, foram realizadas simulações que objetivaram o estudo comparativo de modelos de controladores clássicos e de ganhos dinâmicos, porém, partindo do ponto que estes fossem simples de ajustar apenas com modificações de parâmetros. Os controladores utilizados foram o Proporcional Integral Derivativo (PID), Proporcional Derivativo com compensação de gravidade (PDG), controlador com ganhos escalonados através de funções não lineares (GS) e controlador com ganhos ajustados por sistema fuzzy.

As comparações utilizaram gráficos para análise visual do comportamento dos controladores, e informações mais específicas foram dadas através de tabelas. Com base nos dados apresentados foi possível ver que o controlador GS obteve resultado superior aos demais quando utilizado em uma operação fixa, porém o controlador fuzzy foi, de longe, o que apresentou os melhores resultados quando comparado aos demais no quesito de adaptação às mais diversas situações de operação.

Os resultados apresentados no capítulo 4 deixaram claro que o controlador fuzzy tem a capacidade de manter desempenho mesmo com a modificação de trajetórias e, além disso, ainda é capaz de suportar mudanças do meio onde o manipulador está trabalhando e, até mesmo, perturbações externas. O fato do desempenho ter sido mantido mesmo em condições de aceleração de gravidade diferentes para as quais o controlador foi projetado faz com que este controlador seja uma possível escolha para aplicações espaciais onde sejam necessários trabalhos com manipuladores robóticos.

Dos controladores de ganhos variáveis apresentados, o fuzzy permite que sejam criadas placas de controle que utilizam PID com ajuste de ganhos por fuzzy; desta forma, ao invés de escolher os ganhos do controlador PID, seriam escolhidos os parâmetros do conjunto fuzzy. O controlador GS não teria uma fácil implementação pois, apesar de ter apresentado os melhores resultados para a região que foi projetado, seriam necessários ajustes nos parâmetros e talvez até na própria função utilizada para escolher os ganhos. Assim, o fato de não haver uma função que possa ser utilizada de forma generalizada para a modificação adequada dos ganhos do controlador faz com que a implementação GS como um produto seja bem mais complicada do que o modelo fuzzy utilizado. A grande vantagem da implementação do controlador fuzzy como um produto estaria na dispensa da necessidade de ajustar os ganhos toda vez que fosse necessária uma modificação nas operações do robô.

5.2 Resumo das Contribuições da Dissertação

De modo mais específico as principais contribuições da dissertação foram as seguintes:

1. Oferecer à comunidade científica, por meio de revisão bibliográfica sobre o tema, uma panorama geral das abordagens disponíveis na literatura sobre controle de manipuladores industriais;
2. Estudo comparativo envolvendo modelos de controle clássico e de ganhos variáveis na tarefa de controle de posição em manipuladores robóticos;
3. Estudo da capacidade de adaptação dos controladores em diferentes regiões de operação;
4. Disponibilização em repositório dos códigos das simulações realizadas em linguagem Julia;
5. Demonstração do desempenho do controlador ajustado por fuzzy do ponto de vista de rejeição de perturbação.

5.3 Trabalhos Futuros

Um grande número de propostas de trabalhos na linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação pode ainda ser desenvolvida. Dentre os potenciais temas de pesquisa futura podem ser listadas as seguintes direções:

1. Demonstração da estabilidade do controlador ajustado por lógica fuzzy aqui utilizado;
2. Testes em robôs reais (SCARA e de estrutura paralela) disponíveis no CENTAURO (Centro de Referência em Automação e Robótica), da UFC;
3. Estudo do desempenho do controlador ajustado por fuzzy em outros tipos de sistemas além de manipuladores;
4. Desenvolvimento da placa controladora utilizando o controlador de melhor desempenho deste trabalho;
5. Criação de pacote em linguagem Julia para simulação de manipuladores robóticos;

Referências

ADEPT TECHNOLOGY, INC. *Site da ADEPT TECHNOLOGY, INC.* 2015. Disponível em: <<http://www.adept.com/images/products/adept-cobra-800.jpg>>. Citado na página 35.

AN, C. H.; ATKESON, C. G.; HOLLERBACH, J. M. Experimental determination of the effect of feedforward control on trajectory tracking errors. In: IEEE. *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on.* [S.l.], 1986. v. 3, p. 55–60. Citado na página 27.

APKARIAN, P.; ADAMS, R. J. Advanced gain-scheduling techniques for uncertain systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 6, n. 1, p. 21–32, 1998. Citado na página 27.

ARRUDA, L. V. R. d. et al. Um método evolucionário para sintonia de controladores pi/pid em processos multivariáveis. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 19, n. 1, p. 1–17, 2008. Citado na página 27.

BINGUL, Z. A new pid tuning technique using differential evolution for unstable and integrating processes with time delay. In: SPRINGER. *Neural Information Processing.* [S.l.], 2004. p. 254–260. Citado na página 56.

CARELLI, R.; CAMACHO, E. F.; PATINO, D. A neural network based feedforward adaptive controller for robots. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 25, n. 9, p. 1281–1288, 1995. Citado na página 28.

CARVALHO, J. S. F. de. *Controle Adaptativo aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar.* Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 2009. Citado na página 27.

CHIHA, I.; GHABI, J.; LIOUANE, N. Tuning pid controller with multi-objective differential evolution. In: IEEE. *Communications Control and Signal Processing (ISCCSP), 2012 5th International Symposium on.* [S.l.], 2012. p. 1–4. Citado na página 56.

CLARKE, D.; GAWTHROP, P. Self-tuning control. In: IET. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* [S.l.], 1979. v. 126, n. 6, p. 633–640. Citado na página 28.

CLARKE, D. W.; GAWTHROP, P. J. Self-tuning controller. In: IET. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* [S.l.], 1975. v. 122, n. 9, p. 929–934. Citado na página 28.

CRAIG, J. J. *Introduction to robotics: mechanics and control.* [S.l.]: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005. v. 3. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.

CRAIG, J. J.; HSU, P.; SASTRY, S. S. Adaptive control of mechanical manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Publications, v. 6, n. 2, p. 16–28, 1987. Citado na página 28.

DEY, C.; MUDDI, R. K.; SIMHACHALAM, D. A simple nonlinear pd controller for integrating processes. *ISA transactions*, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 162–172, 2014. Citado na página 27.

DUBOWSKY, S.; DESFORGES, D. The application of model-referenced adaptive control to robotic manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, American Society of Mechanical Engineers, v. 101, n. 3, p. 193–200, 1979. Citado na página 28.

FAVIER, G.; HASSANI, M. Multivariable self-tuning controllers based on generalized minimum variance strategy. In: IEEE. *Decision and Control, 1982 21st IEEE Conference on*. [S.l.], 1982. p. 770–777. Citado na página 28.

FISNAR. *Site da Fisnar*. 2015. Disponível em: <<http://www.fisnar.com/>>. Citado na página 35.

GE, S.; WANG, C.; TAN, Y. Adaptive control of partially known nonlinear multivariable systems using neural networks. In: IEEE. *Intelligent Control, 2001. (ISIC'01). Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2001. p. 292–297. Citado na página 28.

GRABCAD. *Site da GrabCad Community*. 2015. Disponível em: <<https://grabcad.com/requests/seiko-rt3300>>. Citado na página 34.

HO, H.; WONG, Y.-K.; RAD, A. B. Robust fuzzy tracking control for robotic manipulators. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, v. 15, n. 7, p. 801–816, 2007. Citado na página 27.

HUANG, J.; YANG, C.; YE, J. Nonlinear pd controllers with gravity compensation for robot manipulators. *Cybernetics and Information Technologies*, v. 14, n. 1, p. 141–150, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 49.

IFR. *International Federation of Robotic, IFR*. [S.l.], 2015 (Acessado em 05/10/2015). Disponível em: <<http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>>. Citado na página 25.

ISO. *ISO 8373 Robots and robotic devices - Vocabulary*. [S.l.], 2012. Citado na página 25.

JULIA ORG. *Julia*. 2015. Disponível em: <<http://julialang.org/>>. Citado na página 55.

KELLY, R. Global positioning of robot manipulators via pd control plus a class of nonlinear integral actions. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 43, n. 7, p. 934–938, 1998. Citado na página 27.

KELLY, R.; CARELLI, R. A class of nonlinear pd-type controllers for robot manipulators. *Journal of Robotic Systems*, Wiley Online Library, v. 13, n. 12, p. 793–802, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 49.

KELLY, R.; DAVILA, V. S.; PEREZ, J. A. L. *Control of robot manipulators in joint space*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 40, 43, 46, 47 e 48.

KELLY, R.; SALGADO, R. Pd control with computed feedforward of robot manipulators: A design procedure. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 10, n. 4, p. 566–571, 1994. Citado na página 27.

- LE, T. D. et al. An online self-gain tuning method using neural networks for nonlinear pd computed torque controller of a 2-dof parallel manipulator. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 116, p. 53–61, 2013. Citado na página 27.
- LEWIS, F. L.; DAWSON, D. M.; ABDALLAH, C. T. *Robot manipulator control: theory and practice*. [S.l.]: CRC Press, 2003. Citado na página 34.
- LI, F. et al. Fuzzy-model-based-stability and nonfragile control for discrete-time descriptor systems with multiple delays. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 1019–1025, 2014. Citado na página 27.
- LI, Y.; TONG, S. Adaptive fuzzy output-feedback control of pure-feedback uncertain nonlinear systems with unknown dead zone. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 1341–1347, 2014. Citado na página 27.
- LLAMA, M. A.; KELLY, R.; SANTIBAÑEZ, V. A stable motion control system for manipulators via fuzzy self-tuning. *Fuzzy sets and systems*, Elsevier, v. 124, n. 2, p. 133–154, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.
- LOST ART. *LOST ART- Laboratory of screw theory applied to robot technology*. 2015. Disponível em: <[http://helix.gatech.edu/Students/SiouxWill/I2\)21\)us.htm](http://helix.gatech.edu/Students/SiouxWill/I2)21)us.htm)>. Citado na página 32.
- MELO, D. B. de. *Algoritmos de aprendizagem para aproximação da cinemática inversa de robôs manipuladores: Um estudo comparativo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2015. Citado na página 44.
- MEZA, J. L. et al. Fuzzy self-tuning pid semiglobal regulator for robot manipulators. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 59, n. 6, p. 2709–2717, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 27, 55, 58 e 60.
- MISIR, D.; MALKI, H. A.; CHEN, G. Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller. *Fuzzy sets and systems*, Elsevier, v. 79, n. 3, p. 297–314, 1996. Citado na página 27.
- MOZELLI, L. Controle fuzzy para sistemas takagi-sugeno: Condições aprimoradas e aplicações. *Diss. de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais*, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 50, 52 e 53.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *National Instruments 7340 User Manual and Specifications*. [S.l.], 2013. Citado na página 48.
- OLIVEIRA, A. S. d. Retrofitting de robôs manipuladores com incorporação de controle de posição e força: aplicação em um robô industrial. Florianópolis, SC, 2007. Citado na página 44.
- OSTALCZYK, P. et al. The variable, fractional-order discrete-time pd controller in the iisv1. 3 robot arm control. *Central European Journal of Physics*, Springer, v. 11, n. 6, p. 750–759, 2013. Citado na página 27.
- OVIEDO, J. E.; BOELEN, T.; OVERSCHEE, P. van. Robust advanced pid control. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 26, n. 1, p. 15–19, 2006. Citado na página 27.

- PASSARO, M. C.; SILVA, A. P. Alves da; LIMA, A. Preventive control stability via neural network sensitivity. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 29, n. 6, p. 2846–2853, 2014. Citado na página 27.
- PATAN, K. Neural network-based model predictive control: Fault tolerance and stability. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1147–1155, 2015. Citado na página 27.
- PCROBOTICS LTD. *Site da PCRobotics Ltd.* 2015. Disponível em: <<http://www.pcrobotics.co.uk/images/IRB1400%20trans.png>>. Citado na página 33.
- PURWAR, S.; KAR, I. N.; JHA, A. N. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints. In: IEEE. *Fuzzy Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2004. v. 3, p. 1449–1454. Citado na página 27.
- RAFIEI, S. et al. Ieee-519-based real-time and optimal control of active filters under nonsinusoidal line voltages using neural networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 815–821, 2002. Citado na página 27.
- REYES, F.; KELLY, R. Experimental evaluation of model-based controllers on a direct-drive robot arm. *Mechatronics*, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 267–282, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 55.
- ROBODK. *RoboDK*. 2015. Disponível em: <<http://www.robodk.com/help.php>>. Citado na página 26.
- ROMANO, V. F. *Robótica Industrial*. [S.l.]: Edgard Blucher, São Paulo, 2002. Citado na página 25.
- SANTIBAÑEZ, V.; KELLY, R. Pd control with feedforward compensation for robot manipulators: analysis and experimentation. *Robotica*, Cambridge Univ Press, v. 19, n. 01, p. 11–19, 2001. Citado na página 27.
- SONG, Z. et al. A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, Elsevier, v. 154, n. 2, p. 208–226, 2005. Citado na página 27.
- SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot modeling and control*. [S.l.]: Wiley New York, 2006. v. 3. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 35.
- SU, Y.; MÜLLER, P. C.; ZHENG, C. Global asymptotic saturated pid control for robot manipulators. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 1280–1288, 2010. Citado na página 27.
- TONG, S.; HUO, B.; LI, Y. Observer-based adaptive decentralized fuzzy fault-tolerant control of nonlinear large-scale systems with actuator failures. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 1–15, 2014. Citado na página 27.
- TSAI, C.-H.; WANG, C.-H.; LIN, W.-S. Robust fuzzy model-following control of robot manipulators. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 462–469, 2000. Citado na página 27.

TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1996. Citado na página 51.

WU, S. Multivariable pid control using improved state space model predictive control optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, 2015. Citado na página 27.

XU, J.; QIAO, L. Robust adaptive pid control of robot manipulator with bounded disturbances. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013. Citado na página 27.

YU, Z.; CHEN, H.; WOO, P.-y. Gain scheduled lpv $h \infty$ control based on lmi approach for a robotic manipulator. *Journal of Robotic Systems*, Wiley Online Library, v. 19, n. 12, p. 585–593, 2002. Citado na página 27.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and control*, World Scientific, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Citado na página 50.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—i. *Information sciences*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 199–249, 1975. Citado na página 51.

ZHU, X.-L.; WANG, Y. Stabilization for sampled-data neural-network-based control systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 41, n. 1, p. 210–221, 2011. Citado na página 27.