



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC
ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO, CONTROLE E ROBÓTICA**

BRUNO QUEIROZ GAMA

**CONTROLE DE UM SISTEMA DE MANIPULAÇÃO
PARA UM ROBÔ DE INSPEÇÃO EM LINHAS DE ALTA
TENSÃO**

Salvador
Dezembro, 2014

BRUNO QUEIROZ GAMA

**CONTROLE DE UM SISTEMA DE MANIPULAÇÃO PARA UM ROBÔ DE
INSPEÇÃO EM LINHAS DE ALTA TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação, Controle e Robótica da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIMATEC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Automação, Controle e Robótica.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio dos Reis

Salvador
Dezembro, 2014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI - CIMATEC

G184c Gama, Bruno Queiroz

Controle de um sistema de manipulação para um robô de inspeção em linhas de alta tensão / Bruno Queiroz Gama – Salvador, 2014.

57 f. : il. color.

Orientador: Prof. MSc. Marco Antonio dos Reis.

Monografia (Especialização em Automação, Controle e Robótica) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2014.

Inclui referências.

1. Modelagem e Controle - Robô. 2. Controle em cascata. 3. Robótica móvel. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Reis, Marco Antonio dos. III. Título.

CDD 629.892

BRUNO QUEIROZ GAMA

CONTROLE DE UM SISTEMA DE MANIPULAÇÃO PARA UM ROBÔ DE INSPEÇÃO EM
LINHAS DE ALTA TENSÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Automação, Controle e Robótica da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIMATEC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Automação, Controle e Robótica.

Aprovado em 10 de janeiro de 2015.

Banca Examinadora

Marco Antonio dos Reis - Orientador _____
Mestre em Produtividade pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Rômulo Guedes Cerqueira _____
Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Tiago Silveira de Andrade Cahyba _____
Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial pela Faculdade de Tecnologia
SENAI CIMATEC, Salvador-BA, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Dezembro, 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, a minha mãe Maria do Socorro, a meu pai Normando, a minha noiva Carla e a meus irmãos: Tone, Júnior e Max.

Agradeço ao meu orientador Marco por aceitar esse projeto e aos meus amigos da UFBA, especialmente Pedro e Samy, por me apoiarem e ajudarem nessa tarefa.

Sou grato ao ISI em Automação e Controle e ao meu coordenador, Dr. Herman Augusto Lepikson, por todo suporte e apoio que me foi dado para realização deste trabalho.

Agradeço à Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, pela estrutura fornecida para o desenvolvimento da pesquisa realizada.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de modelagem e controle para o sistema de manipulação de um robô de inspeção em linhas de alta tensão desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Robótica no SENAI-CIMATEC. A partir de ensaios experimentais e com o auxílio do software MATLAB foi desenvolvido uma estratégia de controle de velocidade em cascata com controle de posição para o sistema em questão. Portanto, este trabalho busca estudar uma abordagem de modelagem e controle dentre as diversas existentes com aplicação em robótica móvel.

Palavras-chaves: Modelagem e Controle. Controle em Cascata. Robótica móvel.

ABSTRACT

This paper proposes a modeling and control for the handling system of an inspection robot for power lines developed by the Brazilian Institute of Robotics at SENAI-CIMATEC. From experimental tests and with the help of MATLAB software was developed a cascade speed control strategy with position control for the system in question. Therefore, this work studies the modeling and control approach among the various existing with applications in mobile robotics.

Key-words: Modeling and Control. Cascade Control. Mobile Robotics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura mecânica do sistema robótico proposto para inspeção de linhas vivas de 138 kV	17
Figura 2 – Unidades da estrutura mecânica do sistema robótico proposto	18
Figura 3 – Diagrama de Arquitetura Geral do robô de Inspeção de Linhas Vivas	19
Figura 4 – Malha fechada para controle de posição de uma haste do robô	20
Figura 5 – Respostas em Malha Aberta	23
Figura 6 – Gráfico da resposta característica de um processo representado pela equação 3.1	24
Figura 7 – Gráfico da resposta característica de um processo representado pela equação 3.5	25
Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema de controle	28
Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema com controladores em cascata	31
Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada	31
Figura 11 – Motor Dynamixel MX-106R	33
Figura 12 – Ensaio Experimental Motor 1: Motor Dynamixel MX-106R	35
Figura 13 – Ensaio Experimental Motor 2: Motor Dynamixel MX-106R	35
Figura 14 – Ensaio Experimental Motor 3: Motor Dynamixel MX-106R	36
Figura 15 – Ensaio Experimental Motor 4: Motor Dynamixel MX-106R	36
Figura 16 – Ensaio Experimental Motor 5: Motor Dynamixel MX-106R	37
Figura 17 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 1: Motor Dynamixel MX-106R	40
Figura 18 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 2: Motor Dynamixel MX-106R	40
Figura 19 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 3: Motor Dynamixel MX-106R	41
Figura 20 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 4: Motor Dynamixel MX-106R	41
Figura 21 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 5: Motor Dynamixel MX-106R	42
Figura 22 – Ensaio Experimental Robô 1: Junta Robótica IRoS	45
Figura 23 – Ensaio Experimental Robô 2: Junta Robótica IRoS	45
Figura 24 – Ensaio Experimental Robô 3: Junta Robótica IRoS	46
Figura 25 – Ensaio Experimental Robô 4: Junta Robótica IRoS	46
Figura 26 – Ensaio Experimental Robô 5: Junta Robótica IRoS	47
Figura 27 – Ensaio Experimental Robô 6: Junta Robótica IRoS	47
Figura 28 – Ensaio Experimental Robô 7: Junta Robótica IRoS	48
Figura 29 – Ensaio Experimental Robô 8: Junta Robótica IRoS	48

Figura 30 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 1: Junta Robótica	50
Figura 31 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 2: Junta Robótica	50
Figura 32 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 3: Junta Robótica	51
Figura 33 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 4: Junta Robótica	51
Figura 34 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 5: Junta Robótica	52
Figura 35 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 6: Junta Robótica	52
Figura 36 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 7: Junta Robótica	53
Figura 37 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 8: Junta Robótica	53
Figura 38 – Simulação do Controlador: Visualização do tempo de acomodação	55
Figura 39 – Simulação do Controlador: Visualização do erro em regime permanente . .	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIR	Brazilian Institute of Robotics
CLP	Controlador Lógico Programável
FT	Função de Transferência
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
FTMF	Função de Transferência de Malha Fechada
m	Metro
Kp	Ganho proporcional do controlador PID
Ki	Ganho integral do controlador PID
Kd	Ganho derivativo do controlador PID
MA	Malha Aberta
MF	Malha Fechada
N	Newton
Pd	Pólo desejado
PID	Proporcional Integral Derivativo
rad	Radiano
ROS	Robot Operating System
ts	Tempo de acomodação
s	Segundo
SISO	Single Input, Single Output
ω_s	Frequência de Amostragem dos Sensores de Posição e Velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	METODOLOGIA	13
2	ROBÓTICA	15
2.1	INSPEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO	16
2.2	ROBÔ IRoS - INSPECTION ROBOT SYSTEM (CEMIG)	17
2.2.1	SISTEMA DE CONTROLE DO ROBÔ IRoS	19
3	MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS	21
3.1	MODELAGEM POR RESPOSTA AO DEGRAU	22
3.1.1	MODELO A DOIS PARÂMETROS	23
3.1.2	MODELO A TRÊS PARÂMETROS	24
3.1.3	MODELO A QUATRO PARÂMETROS	26
3.1.4	MODELO DO SISTEMA ROBÓTICO IRoS	26
4	CONTROLE DE SISTEMAS DE MALHA FECHADA	27
4.1	AÇÕES DE CONTROLE	27
4.1.1	AÇÃO DE CONTROLE ON-OFF	28
4.1.2	AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL	28
4.1.3	AÇÃO DE CONTROLE INTEGRAL	29
4.1.4	AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL	29
4.1.5	AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO	29
4.1.6	AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO	30
4.2	CONTROLE EM CASCATA	30
4.3	ANÁLISE DO LUGAR DAS RAÍZES	31
4.4	CONTROLADOR UTILIZADO	32
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	33
5.1	MOTOR DYNAMIXEL MX-106R	33
5.1.1	MODELAGEM DO MOTOR DYNAMIXEL MX-106R	34
5.1.1.1	APROXIMAÇÃO POR MODELO DE PRIMEIRA ORDEM	38
5.1.1.2	APROXIMAÇÃO POR MODELO INTEGRADOR	39
5.1.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DO MX-106R	39

5.1.3	PROJETO DO CONTROLADOR DO MOTOR DYNAMIXEL MX-106R . . .	42
5.2	ROBÔ	43
5.2.1	MODELAGEM DO ROBÔ CEMIG	44
5.2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DO ROBÔ CEMIG . . .	49
5.2.3	PREJETO DO CONTROLADOR DO ROBÔ IRoS	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	56
	Referências	57

1 INTRODUÇÃO

Muitas empresas tem encarado o desafio de modernizar e inovar em suas estruturas de produção e gestão sob o dever de se tornarem competitivas perante o mercado. Desta forma, a capacidade de realizar inovação tecnológica é necessária para emergir em mercados de alta concorrência. Seguindo este contexto, observa-se a necessidade crescente de engenheiros com conhecimento de técnicas avançadas em automação de linhas de fabricação e robótica (ROSÁRIO, 2006).

Frente ao dever de realizar o crescimento sustentável da sociedade, a automação e a robótica realizou o desenvolvimento e aumentou a eficiência dos processos industriais, no entanto, o mercado passou a exigir maior diversificação e menor tempo de desenvolvimento dos produtos, tornando a exigir maiores evoluções da automação e robótica (ROSÁRIO, 2006).

Diante dessas necessidades de diversificação exigida pelo mercado mundial, algumas empresas e centros de pesquisa encontram-se com a aspiração de desenvolver novos produtos com nível de inovação e diversificação não encontrado no mercado. Este é caso atual do SENAI - CIMATEC, que em seu Instituto Brasileiro de Robótica desenvolve um robô inovador para inspeção em linhas de transmissão de energia elétrica com alta tensão.

A utilização do robô em um campo de atuação no qual exige alta repetitividade e precisão, este produto proporcionará a segurança, visto que o profissional que realiza a inspeção das linhas de transmissão com alta tensão está exposto a um alto grau de periculosidade. Além disso pode-se conseguir alta redução do custo operacional e facilitar o processo de inspeção da linhas vivas.

Visando confeccionar este produto, insere-se este trabalho de conclusão de curso. Uma vez que o robô apresenta as unidades de apoio, tração e busca, enxerga-se a necessidade de projetar um sistema de controle de posição para os movimentos do robô, pois este necessita de alta precisão em seus movimentos dado que a intercorrência de uma falha pode causar um acidente. Desta forma, denominou-se de sistema de manipulação a parte que contem os servomotores, engrenagens e sensores que interliga as unidades de apoio e tração.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal realizar a modelagem e o controle de posição do sistema de manipulação de um robô atualmente desenvolvido pela equipe de microeletrônica e pelo BIR no SENAI - CIMATEC. Este robô deverá realizar a inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, logo o controlador deve garantir a precisão de posicionamento mínima para realização da atividade.

Como produto final deste trabalho de conclusão de curso, espera-se obter a equação do modelo mecânico dos motores e do robô e os ganhos dos controladores usados no sistema de manipulação do robô. Estes controladores deverão ser robustos o suficiente para que os servomotores dessa unidade siga as posições e velocidades de referência configuradas previamente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que existe alto grau de risco presente à vida do profissional responsável por inspecionar linhas de transmissão. Além disso, outra medida possível para inspecionar estas linhas é a utilização de helicópteros dotados de algoritmos computacionais para reconhecimento visual. No entanto, esses métodos são caros e perigosos (DEBENEST *et al.*, 2008).

Diante das dificuldades citadas, nota-se a importância do desenvolvimento da robótica para a inspeção de linhas de transmissão. E, nestes robôs, é de fundamental importância o controle de posição e velocidade de unidades que realizam seu movimento, visto que a depender da aplicação desejada, estes não podem estar sujeito a falhas. Sob esta análise, um sistema de controle que atenda a todas as especificações de desempenho para o movimento do sistema de manipulação do robô é imprescindível para o andamento do projeto.

Entre outros motivos que comprovam a necessidade de um sistema de controle, podem ser acentuados a indispensabilidade de projetar um sistema em malha fechada que siga uma referência configurada pelo controlador com precisão, reduzindo a sensibilidade à variações de parâmetros, permitindo garantir a estabilidade e atenuando o efeito de perturbações.

A realização deste trabalho sustenta-se pela necessidade presente de um sistema de controle de posição para o sistema de manipulação do robô desenvolvido pela equipe de microeletrônica e pelo BIR do SENAI - CIMATEC. Este trabalho visa projetar um sistema de controle que atenda as especificações de movimento do robô para realização da inspeção com segurança e precisão em suas ações.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para realização deste trabalho de conclusão de curso pode ser representada pelos seguintes passos:

1. Estudo de técnicas de modelagem de sistemas dinâmicos.
2. Ensaio experimental do servomotor Dynamixel MX-106R (*utilizado para movimentar o sistema de manipulação do robô*).
3. Seleção de estrutura para o modelo do Dynamixel MX-106R.
4. Estimativa dos parâmetros do modelo do Dynamixel MX-106R.

5. Projeto do controlador interno ao MX-106R a partir do modelo levantado anteriormente.
6. Ensaio experimental das juntas robóticas.
7. Seleção de estrutura para o modelo das juntas robóticas.
8. Projeto dos controladores externos ao servomotor Dynamixel MX-106R.
9. Simulação do modelo controlado via Matlab (*Simulink*).

2 ROBÓTICA

A palavra "robô" foi usada pela primeira vez pelo dramaturgo Karel Capek em 1921. Nessa época a palavra representava a realização do trabalho manual para seres humanos de forma perfeita e incansável. Posteriormente, na Europa, robótica foi definida como "os meios através dos quais robôs são colocados juntos e efetuando trabalho"(FULLER, 1999).

Durante o século XIX, muitos robôs e sistemas automáticos foram desenvolvidos buscando reduzir o esforço braçal humano em tarefas inseguras e desagradáveis. Desta forma pôde-se dedicar esforços para a produção de atividades intelectuais (SILVEIRA; SANTOS, 2004).

Normalmente os robôs apresentam 3 tipos de componentes: partes físicas, instruções internas e instruções adaptáveis para tarefas. Nas partes físicas estão presentes 4 ou 5 unidades (FULLER, 1999):

1. Estrutura mecânica
2. Atuadores
3. Sistema de Controle
4. Ferramentas e Sensores
5. Console de controle manual

Todas as ações do robô devem ser direcionadas pela unidade de controle, de forma que seus movimentos sejam realizados da maneira e no tempo correto. Para dispor de segurança em todas essas ações, os sistemas devem funcionar em malha fechada (realimentação de informação durante a realização da ação desejada).

Projetar um sistema de controle eficiente para atuar no movimento do sistema de manipulação requer uma análise precisa das características da estrutura mecânica, dos atuadores e dos sensores. Logo, realizar a modelagem das unidades que serão controladas é necessária para encontrar a melhor estratégia de controle do robô, pois o sistema de manipulação é um conjunto de articulações a qual o movimento de uma junta influencia na posição de outra. Além disso, o modelo matemático do robô pode variar a depender dos componentes utilizados (SCIAVICCO; SICILIANO, 1999).

2.1 INSPEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional 2013, 16,9% do consumo final de energia é proveniente da Eletricidade (ENERGÉTICA, 2013). Este valor considerável mostra a importância dessa energia para o funcionamento da indústria, dos grandes centros urbanos e da população em geral. Logo, este teriam muitos problemas caso a transmissão dessa energia fosse interrompida, causando desconforto, prejuízo e outras adversidades.

Para transmitir a energia elétrica das usinas até os grandes centros consumidores, a energia percorre longas distâncias através das redes de transmissão. As redes de transmissão são compostas por cabos, torres e isoladores e, devido a sua importância, precisam receber manutenção frequentemente.

O aumento da demanda energética e blackouts tem colocado pressão sobre os proprietários de redes de transmissão em melhorar a manutenção em seus sistemas. Desde então o número de iniciativas em desenvolver robôs para realização da inspeção em linhas de transmissão tem aumentado (TOUSSAINT; POULIOT; MONTAMBAULT, 2009).

A manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica é um trabalho com elevado grau de risco, dado que é necessário que um profissional esteja suspenso na linha a cerca de 100 metros de altura. Durante a manutenção também é fundamental que o fornecimento de energia seja interrompido, para isso uma outra linha de transmissão é sobrecarregada para compensar a linha em manutenção (DEBENEST et al., 2008).

Como opção para evitar submeter uma pessoa à um trabalho de imenso risco, entre outros métodos, existe a inspeção visual realizada através do uso de helicópteros auxiliado por algoritmos de reconhecimento de padrões. No entanto, esses métodos de inspeção são geralmente caros ou ainda assim apresentam risco (DEBENEST et al., 2008 apud ISHINO; TSUTSUMI, 2004).

De acordo com Debenest et al. (2008) e Toussaint, Pouliot e Montambault (2009), uma alternativa para reduzir os custos e perigos da inspeção em linhas de transmissão é a utilização de robôs. No entanto, quanto maior a mobilidade desejada para o robô maior será o peso, quando precisa-se de robôs leves para inspeção em linhas de transmissão.

Desde 1998, Hidro Québec research institute ((TOUSSAINT; POULIOT; MONTAMBAULT, 2009)) tem intensificado o desenvolvimento de robôs aplicados à manutenção em linhas de transmissão. Seus protótipos são capazes de se movimentar 2 metros por segundo e, em cerca de 1 segundo, ultrapassar obstáculos como: espaçadores, amortecedores e grampos de suspensão. Kansai Electric Power Corp. (KEPCO, Japan) e Japan Systems Corp. (JPS) ((DEBENEST et al., 2008)) também desenvolveram um robô de inspeção em linhas de transmissão capaz de se mover sobre os cabos de alta tensão a uma velocidade de 40 metros por minuto, ultrapassar

espaçadores de maneira segura e rápida e ultrapassar suspensões sem tocar na estrutura da torre com inclinação máxima de 30 graus.

2.2 ROBÔ IROS - INSPECTION ROBOT SYSTEM (CEMIG)

Atualmente encontra-se em desenvolvimento no laboratório de microeletrônica e no BIR do SENAI - CIMATEC um robô para inspeção em linhas de transmissão de energia elétrica com alta tensão. O desenvolvimento deste robô busca realizar inovações em relação aos modelos atualmente encontrados no mercado.

Nomeado de robô IROS, este foi idealizado em uma parceria de desenvolvimento entre o SENAI-CIMATEC e a CEMIG (*Companhia Energética de Minas Gerais*). Buscando sempre o caráter inovador neste desenvolvimento, o IROS busca superar seus concorrente no mercado internacional em termos de autonomia, atividades de inspeção e peso.

O dispositivo robótico deverá estar apto a inspecionar linhas de transmissão com tensão entre 124,2 a 151,8 kV com corrente trifásica de 500 A, de forma autônoma, necessitando de operadores apenas para a sua instalação e remoção no trecho inspecionado ou por eventuais paradas de emergência. Ele será fixado ao cabo da linha viva através de garras, como pode ser observado na figura 1 (SENAI - CIMATEC, 2013):

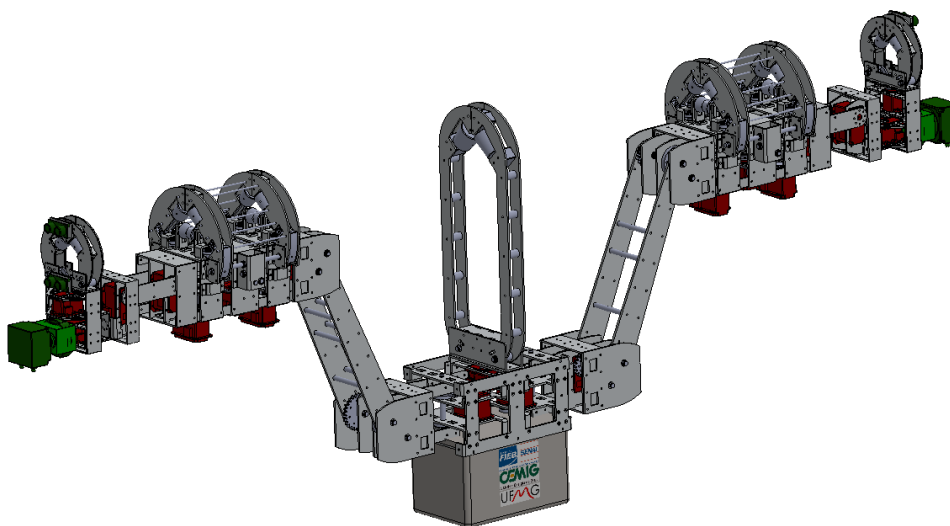


Figura 1 – Estrutura mecânica do sistema robótico proposto para inspeção de linhas vivas de 138 kV (SENAI - CIMATEC, 2013)

O sistema robótico de inspeção pode ser dividido em 3 partes: Unidade de Busca, Unidade de Tração e Unidade de Apoio. Todas as unidades possuem garras para fixação do robô na linha. Uma melhor visualização das unidades pode ser visto na figura 2 (SENAI - CIMATEC, 2013).

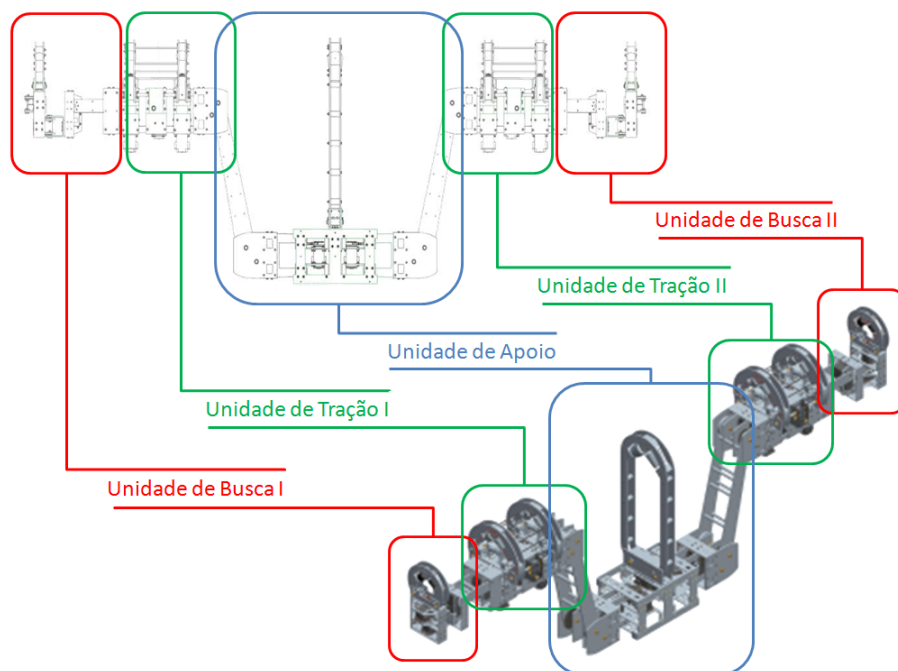


Figura 2 – Unidades da estrutura mecânica do sistema robótico proposto (SENAI - CIMATEC, 2013)

A solução adotada para confecção do projeto propõe a divisão do robô em 8 sistemas (SENAI - CIMATEC, 2013):

1. Sistema de Acionamento;
2. Sistema de Comunicação Externa;
3. Sistema de Controle;
4. Sistema Mecânico;
5. Sistema de Potência;
6. Sistema de Processamento Central;
7. Sistema de Sensores;
8. Sistema de Visualização.

Na figura 3 pode ser visualizado o Diagrama da Arquitetura Geral do robô.

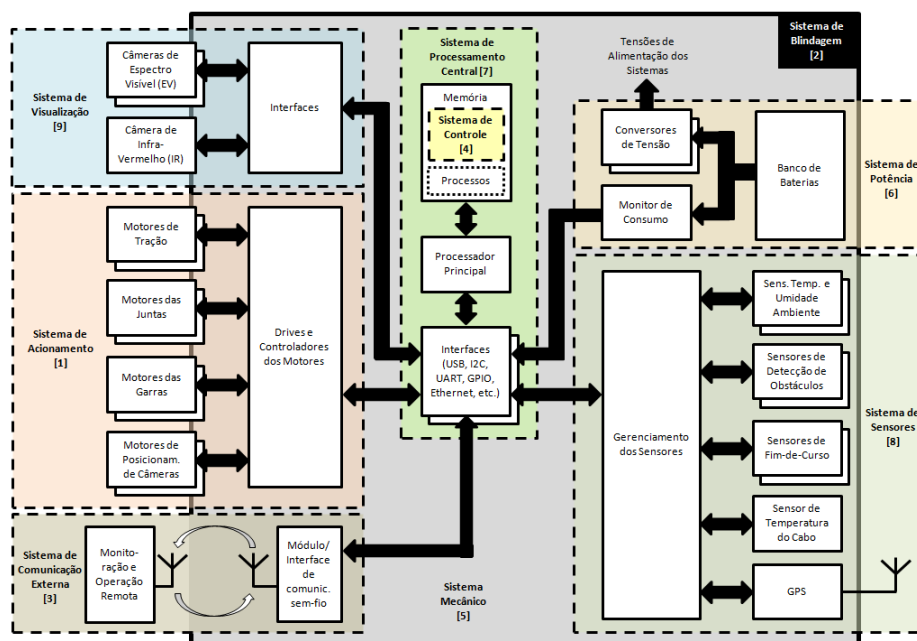


Figura 3 – Diagrama de Arquitetura Geral do robô de Inspeção de Linhas Vivas (SENAI - CIMATEC, 2013)

2.2.1 SISTEMA DE CONTROLE DO ROBÔ IROs

O sistema de controle deve ser implementado a partir de algoritmos que elaborem estratégias de controle para que o robô se desloque na linha, ultrapasse obstáculos e realize as inspeções autonomamente a partir dos dados do Sistema de Sensores (SENAI - CIMATEC, 2013).

Segundo SENAI - CIMATEC (2013 apud SICILIANO; KHATIB, 2008), a estratégia base para o controle do sistema robótico será a adoção de um controle de junta independente. Esta estratégia é descentralizada e as entradas de controle de cada junta apenas dependem do deslocamento e da velocidade da respectiva junta.

Através do controle de junta independente, é possível controlar cada eixo como um sistema SISO. Os efeitos gerados pelas engrenagens durante a realização dos movimentos, entre eles o **backlash**, são tratados como perturbações de saída (SENAI - CIMATEC, 2013).

"Backlash é o motante pelo qual a largura do espaço do dente de uma engrenagem é superior à espessura de um dente de engate no diâmetro primitivo das engrenagens. Como a folga é proveniente da geometria circular das engrenagens, o backlash é uma quantidade angular"(SENAI - CIMATEC, 2013 apud WITTENSTEIN, 2006).

O robô faz uso de engrenagens em seus eixos para atingir o torque necessário à realização do movimento pretendido. Observa-se então que essas engrenagens inserem folgas no sistema (*backlash*), de forma que posição indicada no encoder interno ao servomotor pode não representar a posição real das hastes. Portanto, observou-se a necessidade de implementar uma malha de

controle fechado externo ao servomotor, uma vez que o controlador interno ao Dynamixel MX-106R não poderia garantir a posição desejada para as hastes do robô. A figura 4 representa o sistema de controle implementado (SENAI - CIMATEC, 2013).

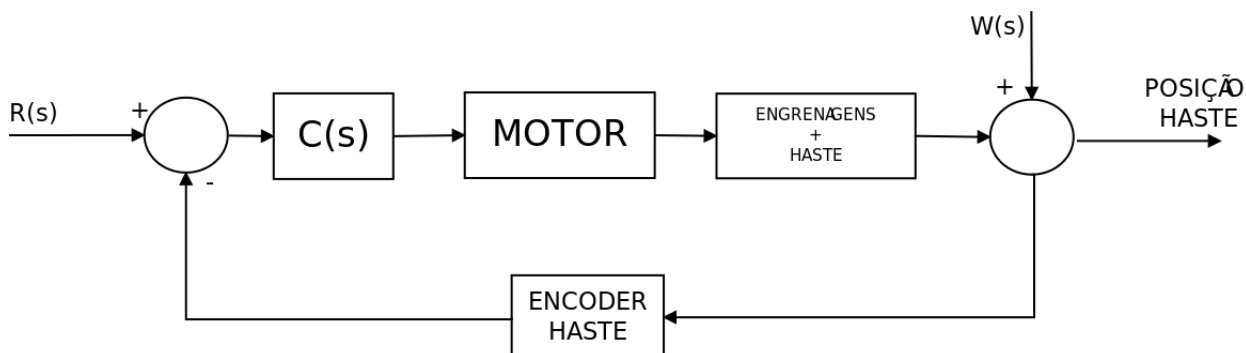


Figura 4 – Malha fechada para controle de posição de uma haste do robô (SENAI - CIMATEC, 2013)

Sendo que $R(s)$ representa a posição de referência, $C(s)$ é a função de transferência do controlador projetado e $W(s)$ são as perturbações de saída.

3 MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS

Em função da necessidade de realizar o projeto do controlador do sistema de manipulação do robô IROS, uma atividade preliminar importante é a modelagem matemática da dinâmica do sistema.

"O modelo matemático de um sistema dinâmico é definido como um conjunto de equações que representa com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem a dinâmica do sistema. Um sistema é representado de muitas maneiras diferentes e, portanto, pode ter vários modelos matemáticos, dependendo da perspectiva a ser considerada"(OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

É muito importante que o engenheiro de controle saiba regular uma conciliação entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados da análise, pois a etapa mais importante na realização de sistemas de controle é a construção de modelos matemáticos (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

O objetivo de encontrar o modelo dos sistemas dinâmicos é escolher os melhores parâmetros do controlador, de forma que a malha de controle execute bem o controle da variável do processo. A escolha dos melhores parâmetros do controlador podem ser escolhidos de duas formas diferentes: O primeiro método seria escolhendo alguns parâmetros, observando o comportamento do sistema e posteriormente ajustando-se os parâmetros até que o sistema apresente o comportamento desejado; O segundo método seria o desenvolvimento do modelo matemático que descreve o comportamento do sistema, e posteriormente, utilizar-se-ia técnicas de controle para escolher os parâmetros do controlador (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

Por se tratar de um sistema eletro-mecânico, o robô IROS necessita de modelagens matemáticas que identifique seus sistemas mecânicos e eletrônicos. Utiliza-se então a segunda lei de Newton (identificação mecânica) e as leis das correntes e das tensões de Kirchhoff (identificação eletrônica) para modelar o sistema.

O modelo dinâmico dos processos elétricos e mecânicos presentes no robô fornecerá a relação entre as entradas e saídas do sistema durante o regime transitório, período o qual é muito mais difícil extrair o comportamento do sistema. No entanto, uma série de modelos podem ser aplicados para sistema lineares invariantes no tempo ou sistemas linearizados em um ponto de equilíbrio (??).

Segundo Astrom e Hagglund (1995): "Em controle de processos, o degrau é a resposta transiente mais usada para identificação de processos". Isto ocorre pois o degrau é o tipo de distúrbio mais fácil de ser gerado manualmente.

3.1 MODELAGEM POR RESPOSTA AO DEGRAU

Segundo [Ikonen e Kaddour \(2002\)](#), são recomendadas as seguintes etapas para realizar a identificação e modelagem de um sistema:

1. **Experimento ou Aquisição de dados:** Tem o objetivo de maximizar o volume das informações coletadas, dentro dos limites impostos pelo processo. Durante esta etapa o período de amostragem dos sensores devem ser suficientemente pequenos para que não ocorra perda de informação. Normalmente chama-se de ω_s a frequência de amostragem do sensor. Para evitar maiores problemas na aquisição de dados, a componente de frequência mais alta do processo deve ser menor que $\frac{\omega_s}{2}$;
2. **Seleção da estrutura do modelo:** Consiste em selecionar a ordem do modelo de forma que não seja simples o bastante para que não tenha dinâmicas não modeladas, mas também que não seja muito complexo dificultando realizar ações de controle;
3. **Estimação dos parâmetros:** Deve-se procurar estimar os parâmetros desconhecidos do modelo selecionado. A escolha dos parâmetros depende da estrutura do modelo selecionado bem como das propriedades das informações coletadas;
4. **Validação do modelo:** O método de validação depende das propriedades desejadas do modelo. Normalmente precisão e extrapolação são desejadas. A simulação será uma ferramenta muito útil para validação do modelo, análise de estabilidade e efeitos de pólos e zeros.

A dinâmica de um sistema linear é representada pela sua resposta transitória, no entanto, necessita-se que o sistema esteja inicialmente em repouso. Modelos obtidos a partir de experimentos transitórios normalmente podem ser sintonizados por controladores PID (??).

Conforme [Astrom e Hagglund \(1995\)](#), o ensaio experimental para aquisição de dados deve ser realizado da seguinte forma:

1. Espere que o processo esteja em repouso;
2. Configure o controlador para o modo manual (*ensaio em malha aberta*);
3. Mude a variável de controle rapidamente;
4. Registre todas as variações do processo e normalize-as dividindo pelas variações da variável de controle;
5. Repita o ensaio para outros valores de amplitude do sinal de entrada e em diferentes condições de operação.

Muitas características podem ser extraídas do sistema a partir do ensaio em malha aberta com entrada igual ao degrau. Informações como: estabilidade ou instabilidade em malha aberta, oscilação ao redor do valor estacionário, processos integradores, tempo morto, sistemas de fase não-mínima, entre outros, pode ser observado na figura 5.

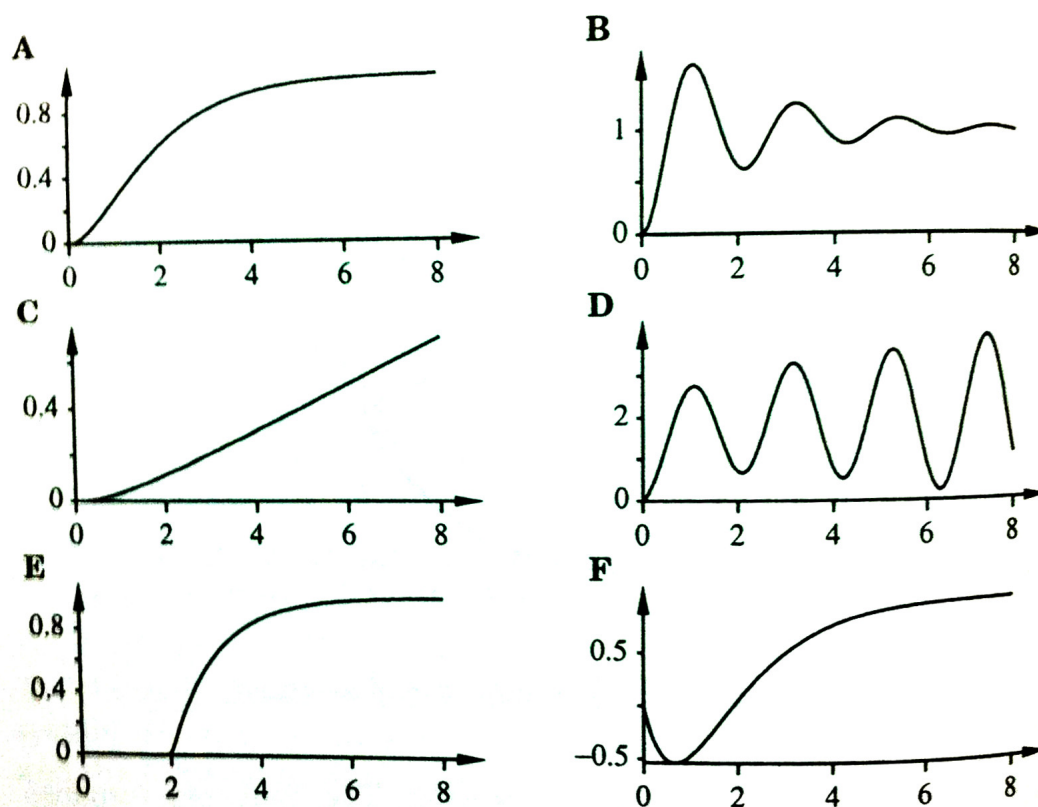


Figura 5 – Respostas em Malha Aberta (ASTROM; HAGGLUND, 1995)

Muitos métodos de sintonia e projeto de sistemas de controle são baseado na curva experimental de resposta ao degrau em malha aberta. Isto ocorre devido a sua simples interpretação física (??).

Muitos métodos de obtenção do modelo dinâmico de sistemas tem sido apresentado na literatura durante anos. Entre eles estão: modelo com dois, três e quatro parâmetros. Esses parâmetros podem ser extraídos a partir da resposta do sistema em malha aberta. Para sistemas lineares estes parâmetros serão constantes, porém para processos não-lineares, os parâmetros dependem das condições de operação (??).

3.1.1 MODELO A DOIS PARÂMETROS

O modelo a dois parâmetros é a mais simples representação de um sistema. Sendo que o primeiro parâmetro é o ganho (K) e o outro é a constante de tempo do sistema (τ). A depender da complexidade, este modelo pode representar de forma satisfatória o processo. O modelo a

dois parâmetros pode ser representado pela equação a seguir, sendo que $G(s)$ representa a função de transferência do sistema (ASTROM; HAGGLUND, 1995):

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (3.1)$$

A resposta do processo, representado pela equação 3.1, à entrada degrau pode ser observado na figura 6.

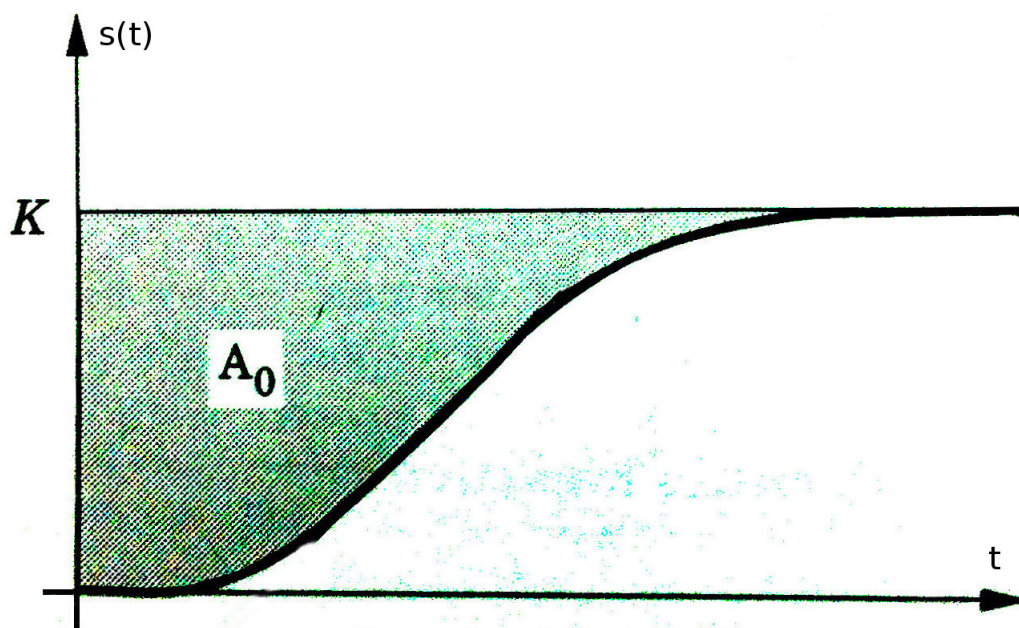


Figura 6 – Gráfico da resposta característica de um processo representado pela equação 3.1 (ASTROM; HAGGLUND, 1995)

Sendo que:

$$K = s(\infty) \quad (3.2)$$

$$A_0 = \int_0^{+\infty} (s(\infty) - s(t)) dt \quad (3.3)$$

$$\tau = \frac{A_0}{K} \quad (3.4)$$

3.1.2 MODELO A TRÊS PARÂMETROS

De acordo com Astrom e Hagglund (1995), a medida que se aumenta o número de parâmetros, melhores aproximações do sistema real podem ser obtidas. A equação 3.5 representa o modelo a três parâmetros. Sendo $G(s)$ a função de transferência do sistema.

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-sL} \quad (3.5)$$

Sendo K o ganho estático do sistema, τ a constante de tempo e L o tempo morto. A resposta descrita pelo modelo da equação 3.5 quando excitado pela entrada igual ao degrau pode ser observador pela figura 7:

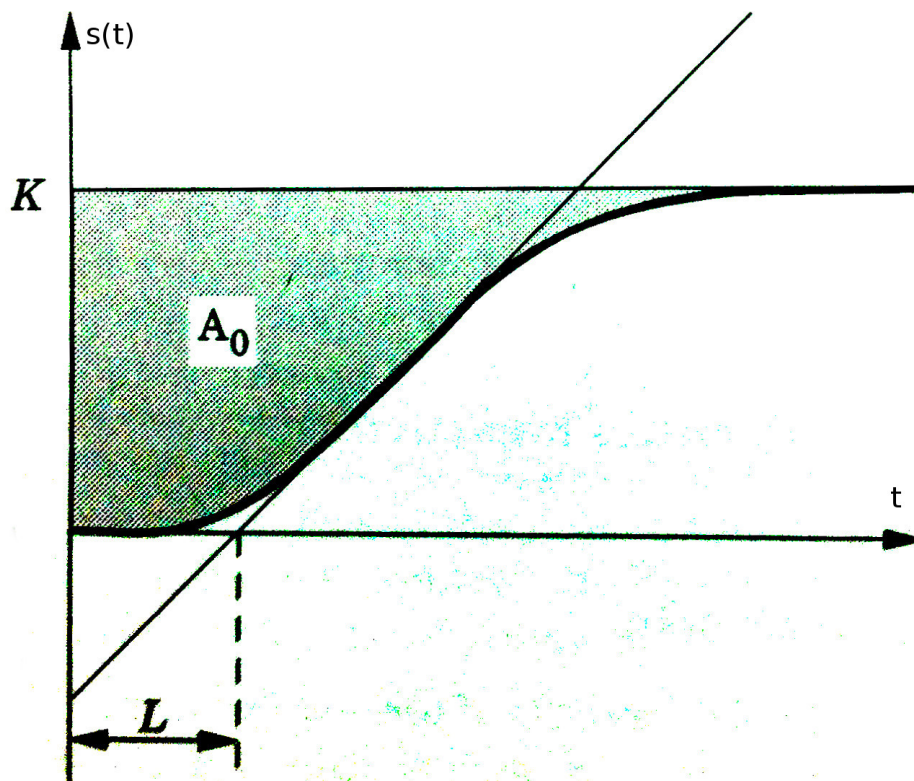


Figura 7 – Gráfico da resposta característica de um processo representado pela equação 3.5 (ASTROM; HAGGLUND, 1995)

A equação a seguir representa curva $s(t)$ apresentada na figura 7:

$$s(t) = K(1 - e^{-(t-L)/\tau}) \quad (3.6)$$

Os parâmetros apresentados na equação 3.5 podem ser obtidos graficamente. O parâmetro L (*tempo morto*) pode ser obtido interceptando a tangente da resposta do processo no momento de subida ao eixo horizontal, como pode ser visto na figura 7. O ganho estático do sistema (K) é representado pelo valor final da saída do processo. O valor de τ pode ser obtido com o auxílio das equações a seguir (ASTROM; HAGGLUND, 1995):

$$T = \frac{\int_0^{+\infty} (s(\infty) - s(t)) dt}{K} \quad (3.7)$$

$$\tau = T - L \quad (3.8)$$

De acordo com [Astrom e Hagglund \(1995\)](#), curvas de respostas à entrada degrau semelhante à apresentada na figura 7, caso apresenta um formato "S" acentuado, podem ser modeladas pela seguinte equação:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + s\tau)^2} e^{-sL} \quad (3.9)$$

Sendo a sua resposta no domínio temporal:

$$s(t) = K \left(1 - \left(1 + \frac{t-L}{\tau} \right) e^{-(t-L)/\tau} \right) \quad (3.10)$$

Nesta formato, o parâmetro τ pode ser obtido a partir de soluções numéricas.

3.1.3 MODELO A QUATRO PARÂMETROS

De acordo com [Astrom e Hagglund \(1995\)](#), uma aproximação ainda melhor de um processo real pode ser obtido pela seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)} e^{-sL} \quad (3.11)$$

Este modelo apresenta quatro parâmetros: ganho (K), tempo morto (L) e constantes de tempo (τ_1 e τ_2). O ganho e o tempo morto podem ser determinados da mesma forma que foram obtidos no modelo a três parâmetros. No entanto, o cálculo das constantes de tempo envolve solução de equações transcendentes e deve ser encontradas numericamente.

A resposta temporal da equação 3.11 quando excitada pelo degrau é:

$$s(t) = K \left(1 + \frac{\tau_2 e^{-(t-L)/\tau_2} - \tau_1 e^{-(t-L)/\tau_1}}{\tau_1 - \tau_2} \right) \quad \tau_1 \neq \tau_2 \quad (3.12)$$

3.1.4 MODELO DO SISTEMA ROBÓTICO IRoS

Pode-se observar nas seções seguintes que o motor e o sistema robótico não apresentaram grande complexidade. Logo, as curvas obtidas com ensaios experimentais apresentaram comportamento de uma função diferencial de 1ª ordem e sem tempo morto, decidiu-se utilizar o modelo a dois parâmetros.

4 CONTROLE DE SISTEMAS DE MALHA FECHADA

Em função da necessidade de que o robô IROS cumpra seus movimentos dentro da especificação desejada, é indispensável a realização do projeto de um sistema de controle em malha fechada para o sistema de manipulação. Esse sistema de controle visa garantir que a posição das juntas tenham precisão em relação ao *setpoint* fornecido.

"Os sistemas de controle com realimentação são, com frequência, denominados também *sistemas de controle de malha fechada*. Na prática, os termos controle com realimentação e controle de malha fechada são usados indistintamente. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas e/ou integrais), realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor desejado. O termo 'controle de malha fechada' sempre implica a utilização do controle com realimentação para efeito de reduzir o erro do sistema" (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

Normalmente os sistemas de controle são representados por diagrama de blocos, descrevendo as inter-relações entre os componentes do processo e indicando o fluxo de sinais do sistema real. O bloco representa uma operação matemática, sendo a função de transferência normalmente incluída nos blocos correspondentes. Desta forma, contém informações relacionadas ao comportamento dinâmico, mas não apresenta informações físicas (??).

Os controladores em malha fechada comparam o valor real da saída da planta com a entrada de referência, buscando reduzir ou zerar este sinal de comparação. A figura 8 é um diagrama de um sistema de controle, o qual contém um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

4.1 AÇÕES DE CONTROLE

Conforme Ogata, Maya e Leonardi (2003), os controladores industriais podem ser classificados de acordo com suas ações de controle da seguinte forma:

1. Controladores on-off;
2. Controladores proporcionais;
3. Controladores integrais;
4. Controladores proporcional-integrais;

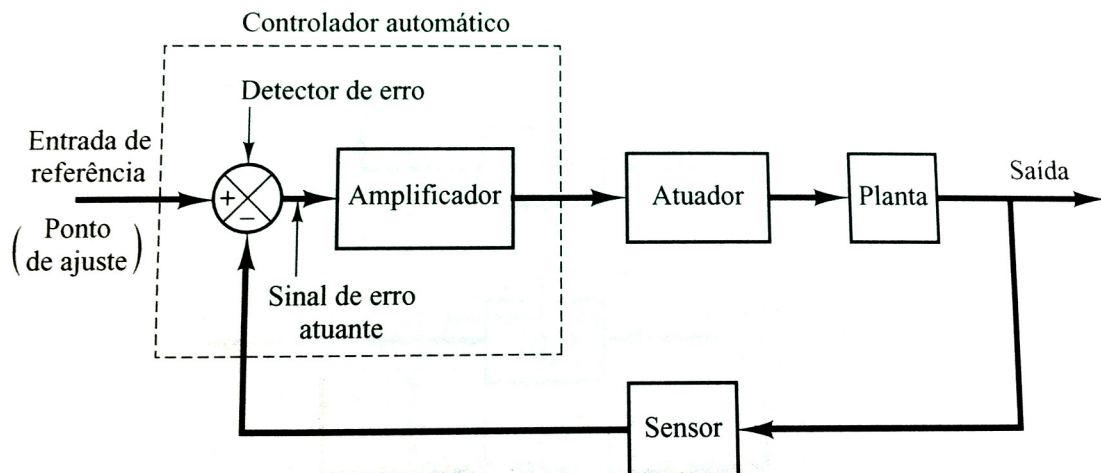


Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema de controle (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003)

5. Controladores proporcional-derivativos;
6. Controladores proporcionais-integral-derivativos.

4.1.1 AÇÃO DE CONTROLE ON-OFF

O controlador on-off é uma estrutura funcional simples, a qual não tem parâmetro a ser configurado e tem apenas duas posições fixas. Esta estratégia busca manter o valor da variável do processo próximo ao valor de *setpoint*, no entanto, o sistema normalmente apresenta oscilações em relação ao valor de referência (??).

Considerando que o sinal de saída do controlador é $u(t)$ e o sinal de erro atuante é $e(t)$, o controlador on-off é condicionado pela seguinte equação:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2 & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

4.1.2 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL

O controlador de ação proporcional tem a seguinte relação entre a sua saída $u(t)$ e sua entrada (*sinal de erro atuante*) $e(t)$ (??):

$$u(t) = K_p e(t)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação anterior, temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (4.1)$$

Esta ação de controle pode evitar os problemas de variação do valor da variável do processo, visto que pequenos sinais de controle são gerados para pequenos sinais de erro. No entanto, normalmente pode haver um erro em estado permanente.

4.1.3 AÇÃO DE CONTROLE INTEGRAL

O controlador de ação integral tem a seguinte relação entre a sua saída $u(t)$ e sua entrada (*sinal de erro atuante*) $e(t)$ (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003):

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação anterior e considerando as condições iniciais nulas, temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (4.2)$$

A função principal da ação de controle integral é assegurar que a saída do processo esteja no valor informado pelo *setpoint* durante o regime permanente. Com a ação de controle integral, um pequeno erro positivo deixará o sinal de controle cada vez maior, e um erro negativo diminuirá o sinal de controle, não importa o quão pequeno é o erro (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

4.1.4 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL

O controlador de ação proporcional-integral tem a seguinte relação entre a sua saída $u(t)$ e sua entrada (*sinal de erro atuante*) $e(t)$ (??):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação anterior e considerando as condições iniciais nulas, temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.3)$$

4.1.5 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO

O controlador de ação proporcional-derivativo tem a seguinte relação entre a sua saída $u(t)$ e sua entrada (*sinal de erro atuante*) $e(t)$ (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003):

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação anterior e considerando as condições iniciais nulas, temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (4.4)$$

4.1.6 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

O controlador de ação proporcional-integral-derivativo tem a seguinte relação entre a sua saída $u(t)$ e sua entrada (*signal de erro atuante*) $e(t)$ (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação anterior e considerando as condições iniciais nulas, temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.5)$$

4.2 CONTROLE EM CASCATA

Normalmente os sistemas de controle são mais complexos que sistemas com uma entrada e uma saída. Logo, um problema a ser resolvido é a escolha das variáveis do processo que devem ser controladas. Dessa forma, o controle em cascata é uma forma de usar vários sinais medidos em uma malha de controle (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

Um exemplo de controle em cascata pode ser visto na figura 9, onde a malha interna é chamado de malha escrava ou secundário e a malha externa é chamada de malha mestre ou primária. Esta estratégia pode ser usada quando um controle mais rigoroso é necessário, então, pode ser conseguida por meio de um sinal de medição intermédia que responde mais rápido ao sinal de controle (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

Quando o controladores em cascata são usados, a malha de controle interno detecta distúrbios muito mais rápido que a malha de controle externa. Dessa forma, grande parte das perturbações são eliminadas pelo controlador secundário (ASTROM; HAGGLUND, 1995).

De acordo com Astrom e Hagglund (1995), para realizar o controle de servomotores pode-se usar controladores em cascata. Sendo que a malha interna ou secundária controlaria a velocidade do servomotor, enquanto a malha externa seria responsável pelo controle de posição. Uma vez que a relação entre posição e velocidade é a integral no tempo, não existe razão para introduzir a ação integral no controle de velocidade nem a ação derivada no controle de posição.

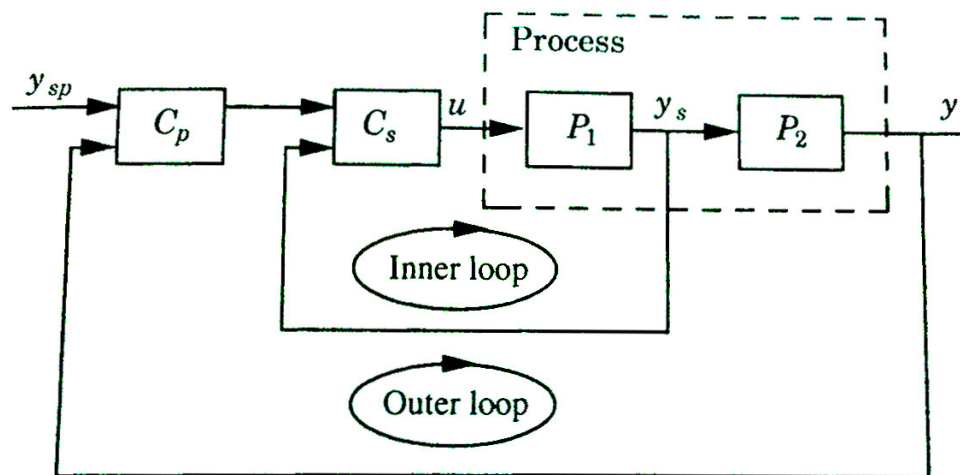


Figura 9 – Diagrama de blocos de um sistema com controladores em cascata (ASTROM; HAGGLUND, 1995)

4.3 ANÁLISE DO LUGAR DAS RAÍZES

Sabendo que a resposta transitória do sistema varia de acordo com a localização dos pólos de malha fechada e que pode mudar a depender do parâmetros configurados no controlador, é importante que o projetista saiba como como os pólos da FTMF se movem no plano s (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

O método do lugar das raízes, desenvolvido por W.R. Evans, permite que obter a localização dos pólos da FTMF a partir da variação do ganho do controlador (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003).

Considerando o seguinte sistema:

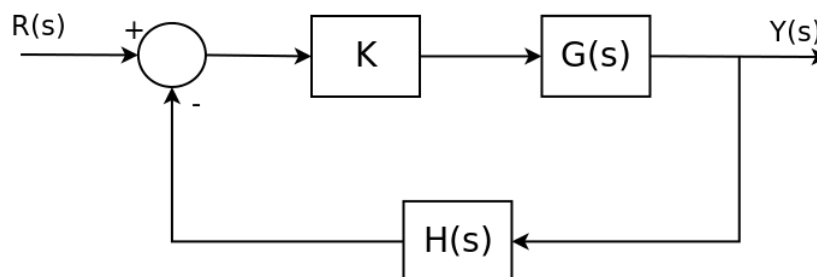


Figura 10 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada

A função de transferência que relaciona a entrada $R(s)$ com a saída $Y(s)$ será:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)H(s)} \quad (4.6)$$

A equação característica do sistema será:

$$1 + KG(s)H(s) = 0$$

$$KG(s)H(s) = -1 \quad (4.7)$$

A partir da equação 4.7 pode-se obter as seguintes condições de módulo e fase:

- Condição de módulo:

$$|KG(s)H(s)| = 1 \quad (4.8)$$

- Condição de fase:

$$\angle KG(s)H(s) = \pm 180^\circ(2k + 1) \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (4.9)$$

Segundo [Ogata, Maya e Leonardi \(2003\)](#), o lugar das raízes é o método para localizar a posição das raízes da equação característica do sistema de malha fechada quando um parâmetro específico (normalmente o ganho K) varia. O gráfico do lugar das raízes mostra as contribuições de cada pólo ou zero de malha aberta nas localizações dos pólos de malha fechada.

4.4 CONTROLADOR UTILIZADO

Diante do estudo realizado, observou-se que o controlador em cascata é indicado para o problema. Desta forma, utilizou-se um servomotor com controlador de velocidade e uma malha de controle externa com realimentação de posição.

Toda a implementação e cálculo dos ganhos dos controladores podem ser vistos na próxima seção.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de projetar o sistema de controle de posição do robô, realizou-se a modelagem e o controle de velocidade do servomotor Dynamixel MX-106R em cascata com o controle de posição das juntas que compõem o sistema de manipulação do robô IRoS. A seção 5.1 apresenta mais detalhes sobre o servomotor Dynamixel MX-106R, sua modelagem e seu controle de velocidade. A seção 5.2 exibe maiores particularidades sobre a modelagem e desenvolvimento do sistema de controle de posição das juntas do robô.

5.1 MOTOR DYNAMIXEL MX-106R

O servomotor Dynamixel MX-106R foi selecionado para realizar o movimento das juntas do robô através de uma criteriosa análise. Levou-se em consideração nesta análise: a massa, os requisitos de torque necessário, a dimensão, a tensão de alimentação e a velocidade (SENAI - CIMATEC, 2013).



Figura 11 – Motor Dynamixel MX-106R

Algumas das características do servomotor MX-106R ilustrado na figura 11 são (SENAI - CIMATEC, 2013):

- Comunicação digital através de interface em rede RS-485;

- Amplitude de rotação de 360° e capacidade de giro contínuo;
- Controlador PID com parâmetros configuráveis;
- Encoder magnético absoluto com resolução de 12 bits.

De acordo com [SENAI - CIMATEC \(2013\)](#), os servomotores Dynamixel MX-106R serão controlados a partir do ROS, *framework* para desenvolvimento de Sistemas Robóticos, utilizando-se interface de comunicação serial.

5.1.1 MODELAGEM DO MOTOR DYNAMIXEL MX-106R

Com o propósito de obter o modelo matemático do servomotor Dynamixel MX-106R, realizou-se uma série de ensaios experimentais. A finalidade dos ensaios é auxiliar na modelagem matemática e em obter a transformada de Laplace da relação entre os sinais de saída e entrada do servomotor. Dessa forma, pode-se conseguir a função de transferência do servomotor e posteriormente aplicar ações de controle PID no sistema.

O servomotor Dynamixel MX-106R apresenta uma malha de controle interna ao dispositivo, impossibilitando a realização do ensaio em malha aberta. Então optou-se pela execução do experimento em malha fechada, mas atribuindo valor igual a zero aos ganhos integral e derivativo no controlador interno ao MX-106R. Usou-se apenas o ganho proporcional do controlador com valor diferente de zero, buscando simplificar a FTMF equivalente. Desta forma, foi estimado uma função de transferência em malha aberta para o servomotor a partir de uma função de transferência em malha fechada inicialmente calculada.

Conforme [Astrom e Hagglund \(1995\)](#), ensaios experimentais para obtenção de modelos devem ser repetidos variando a amplitude do sinal de entrada e as condições de operação. Visando atender esta recomendação, os seguintes parâmetros foram modificados a cada experimento, buscando-se também verificar a linearidade entre as diferentes regiões de operação do servomotor:

- Velocidade de operação (*sinal de entrada do servomotor*);
- Torque solicitado;
- Ganho proporcional do controlador interno ao servomotor Dynamixel MX-106R;

De acordo com [Ogata, Maya e Leonardi \(2003\)](#), um sistema é linear caso possa se aplicar o princípio da superposição. "Na pesquisa experimental de um sistema dinâmico, se causa e efeito forem proporcionais, significando assim que é válida a aplicação do princípio da superposição, então o sistema pode ser considerado linear".

Realizou-se cinco ensaios experimentais. O sistema equivalente ao testado pode ser observado na figura 10 e as características e resultados de cada um dos ensaios foram:

• Ensaio 1:

$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$

torque = 2 N.m;

$K_p = 1.$

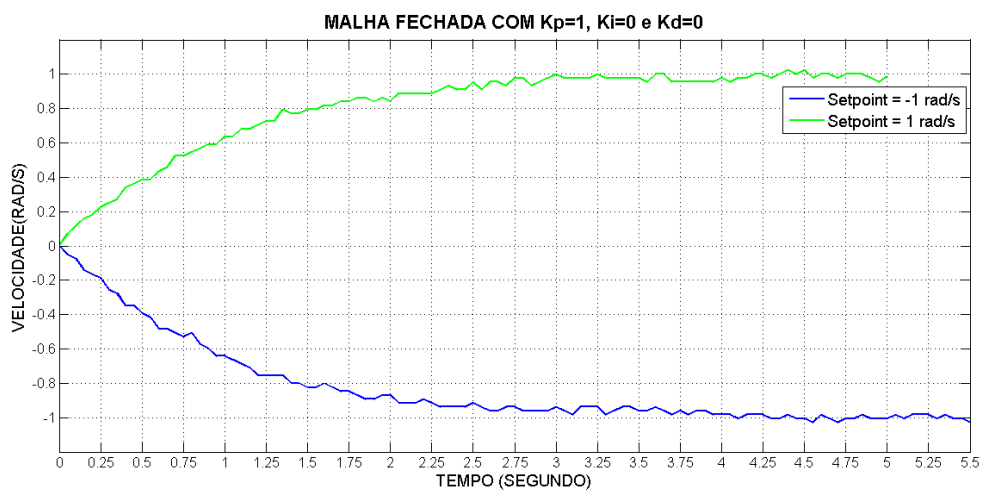


Figura 12 – Ensaio Experimental 1: Motor Dynamixel MX-106R

• Ensaio 2:

$r(t) = \pm 1,5 \text{ rad/s};$

torque = 2 N.m;

$K_p = 1.$

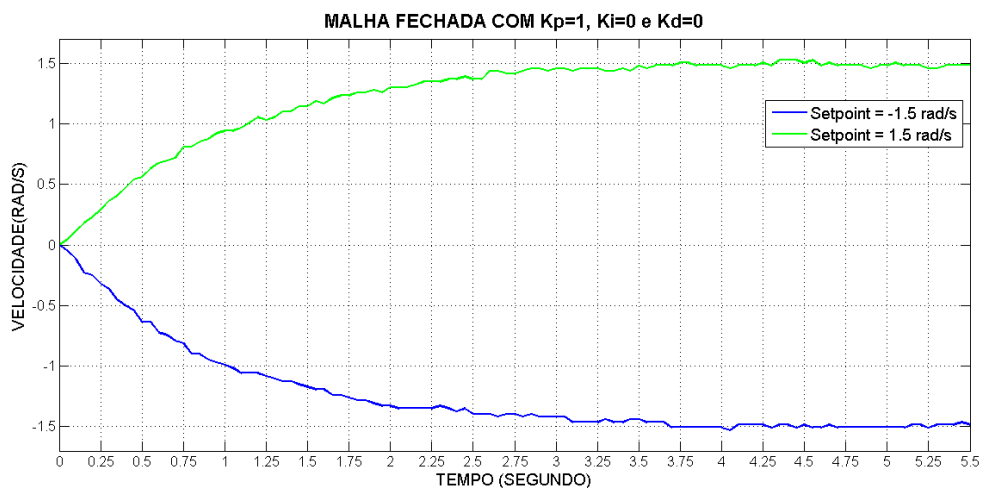


Figura 13 – Ensaio Experimental 2: Motor Dynamixel MX-106R

• Ensaio 3:

$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$
 torque = 2 N.m;
 $K_p = 5.$

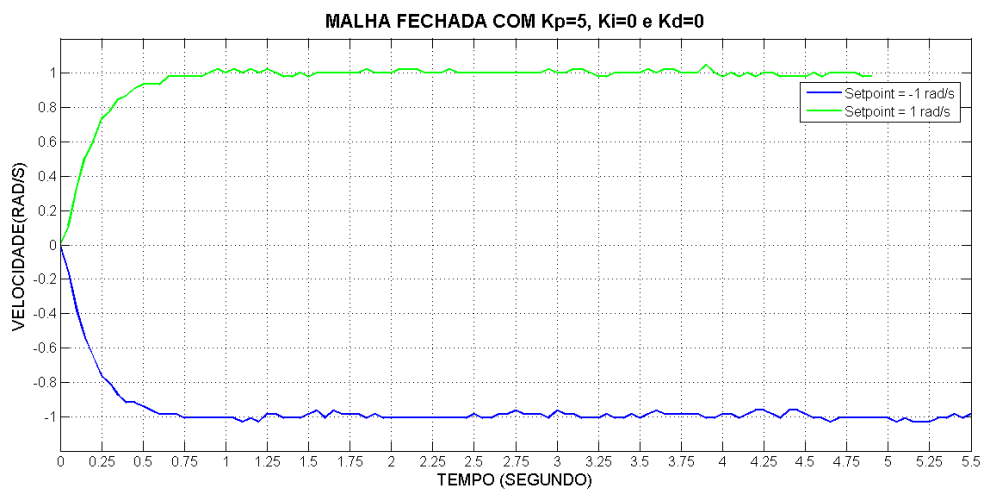


Figura 14 – Ensaio Experimental 3: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 4:

$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$
 torque = 3 N.m;
 $K_p = 1.$

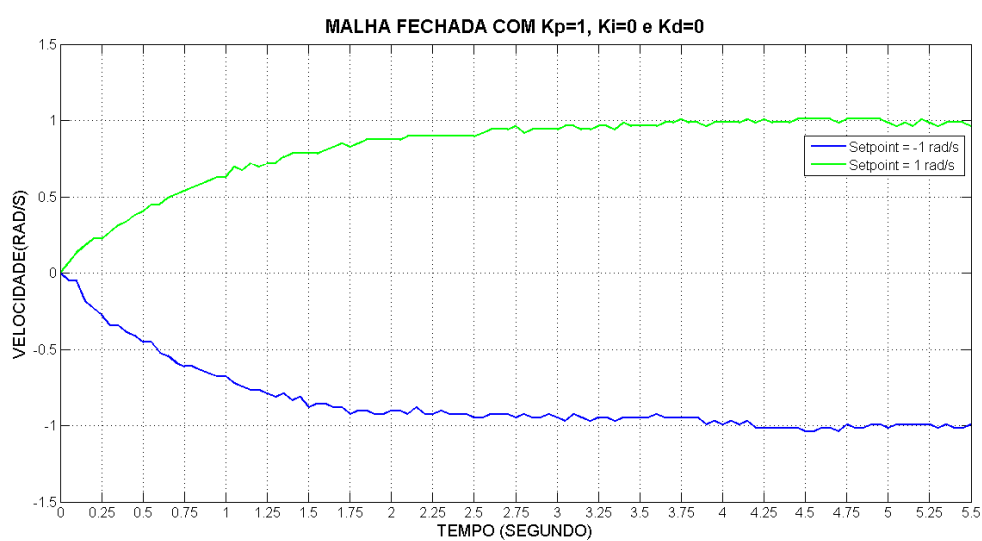


Figura 15 – Ensaio Experimental 4: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 5:

$$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$$

$$\text{torque} = 3 \text{ N.m};$$

$$K_p = 5.$$

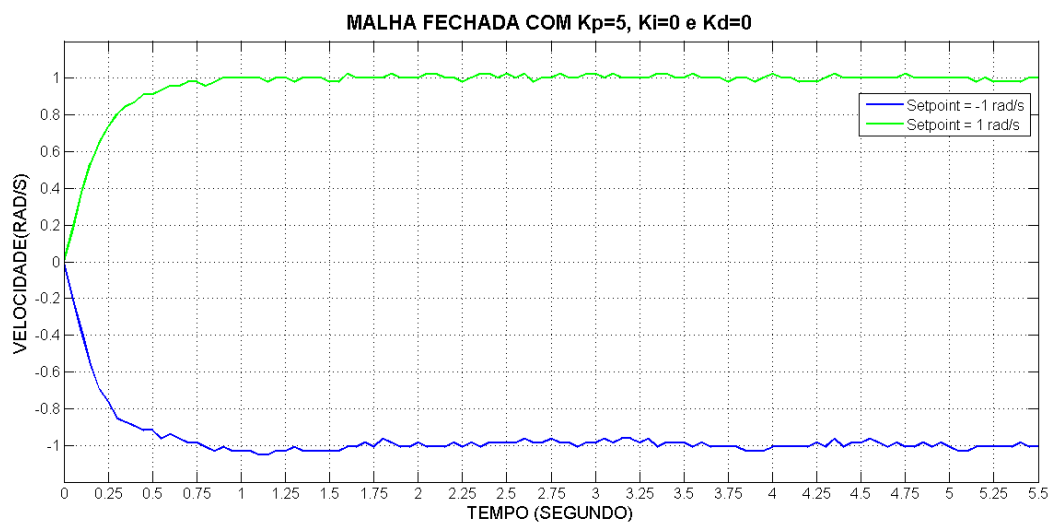


Figura 16 – Ensaio Experimental 5: Motor Dynamixel MX-106R

Com o propósito de obter um modelo equivalente do sistema em malha fechada, pode-se comparar os resultados apresentados acima com a figura 6. Esta comparação permite que o sistema do composto pelo servomotor Dynamixel MX-106R e seu controlador em malha fechada, quando este apresenta apenas o ganho proporcional ativado, seja aproximado por um sistema de primeira ordem. A função de transferência das respostas dos sistemas, cuja as curvas foram apresentadas acima pode ser descrita pela seguinte equação:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (5.1)$$

A partir das equações 3.2, 3.3 e 3.4 e dos conceitos apresentados na seção 3.1.1, pode-se calcular os parâmetros K e τ .

A partir da aproximação da FTMF do sistema servomotor-controlador por um sistema de primeira ordem, estimou-se que servomotor em malha aberta pode apresentar dois modelos:

1. Modelo de primeira ordem: $G(s) = \frac{K'}{1 + \tau' s}$
2. Modelo integrado: $G(s) = \frac{K'}{s}$

Os cálculos dos modelos em malha aberta a partir do modelo de malha fechada podem ser observados nas seções 5.1.1.1 e 5.1.1.2.

5.1.1.1 APROXIMAÇÃO POR MODELO DE PRIMEIRA ORDEM

Conforme informado nas seções anteriores, os ensaios foram realizados em um sistema de malha fechada com realimentação unitária ($H(s) = 1$) semelhantes à figura 10. Logo, sendo o modelo calculado em malha fechada a partir dos experimentos realizados, e exibidos na seção anterior, foi calculado através de uma aproximação uma função de transferência de malha aberta equivalente de primeira ordem.

Considerando que a FTMA, $G(s)$, do servomotor tem o seguinte formato:

$$G(s) = \frac{K'}{1 + \tau' s}$$

Logo, a FTMF, controlador $C(s)$ -servomotor $G(s)$, com realimentação unitária será:

$$G(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{K' K_p}{1 + \tau' s}}{1 + \frac{K' K_p}{1 + \tau' s}} = \frac{K' K_p}{1 + K' K_p + \tau' s}$$

$$G(s) = \frac{\frac{K' K_p}{K' K_p + 1}}{1 + \frac{\tau'}{K' K_p + 1} s} \quad \text{sendo } C(s) = K_p \quad (5.2)$$

Comparando a equação 5.2 com a equação 5.1 temos:

$$\frac{K' K_p}{K' K_p + 1} = K$$

$$K' = \frac{K}{K_p - K K_p} \quad (5.3)$$

$$\frac{\tau'}{K' K_p + 1} = \tau$$

$$\tau' = \tau(K' K_p + 1) \quad (5.4)$$

A partir das equações 5.3 e 5.4 pode obter uma aproximação de primeira ordem do modelo em malha aberta do servomotor Dynamixel MX-106R. O modelo de primeira ordem em malha aberta calculado a partir dos ensaios experimentais pode ser representado a partir da seguinte equação:

$$G(s) = \frac{452,1}{1 + 451,8s}$$

5.1.1.2 APROXIMAÇÃO POR MODELO INTEGRADOR

Realizando os mesmos procedimentos da seção anterior, mas considerando que a FTMA, $G(s)$, do servomotor tem o seguinte formato:

$$G(s) = \frac{K'}{s}$$

Logo, a FTMF, controlador $C(s)$ -servomotor $G(s)$, com realimentação unitária será:

$$G(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{K'K_p}{s}}{1 + \frac{K'K_p}{s}} = \frac{K'K_p}{s + K'K_p}$$

$$G(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K'K_p}s} \quad \text{sendo } C(s) = K_p \quad (5.5)$$

Comparando a equação 5.5 com a equação 5.1 temos:

$$\frac{1}{K'K_p} = \tau$$

$$K' = \frac{1}{K_p\tau} \quad (5.6)$$

Dessa forma, o modelo integrado em malha aberta calculado a partir dos ensaios experimentais pode ser representado a partir da seguinte equação:

$$G(s) = \frac{1,002}{s}$$

5.1.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DO MX-106R

A partir do cálculo de modelos em malha aberta por uma aproximação de primeira ordem e por uma aproximação integradora, realizou-se simulação computacional no software Matlab buscando reproduzir as mesmas condições dos ensaios experimentais. Dessa forma, utilizou-se a FTMA calculada do servomotor e a FT do controlador configurado com o mesmo parâmetro utilizado no experimento.

A figura 10 representa pode representar o diagrama simulado, no qual:

- $G(s)$ representa a FTMA do servomotor;
- K representa o ganho proporcional do controlador. Lembrando que o valor deste ganho sofreu variação de acordo com os ensaios do experimento;
- $H(s) = 1$ (realimentação unitária).

O resultado da simulação computacional do modelo de malha aberta do servomotor Dynamixel MX-106R quando submetido às mesmas condições do ensaio experimental pode ser visto nas figuras a seguir:

- Ensaio 1: $r(t) = \pm 1 \text{ rad/s}$;
 $K_p = 1$.

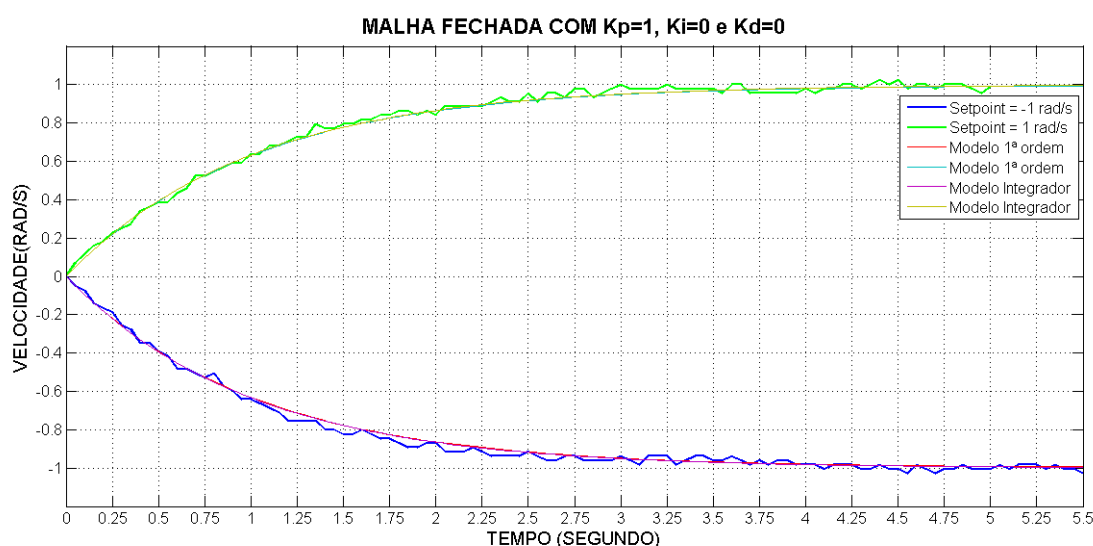


Figura 17 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 1: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 2:
 $r(t) = \pm 1,5 \text{ rad/s}$;
 $K_p = 1$.

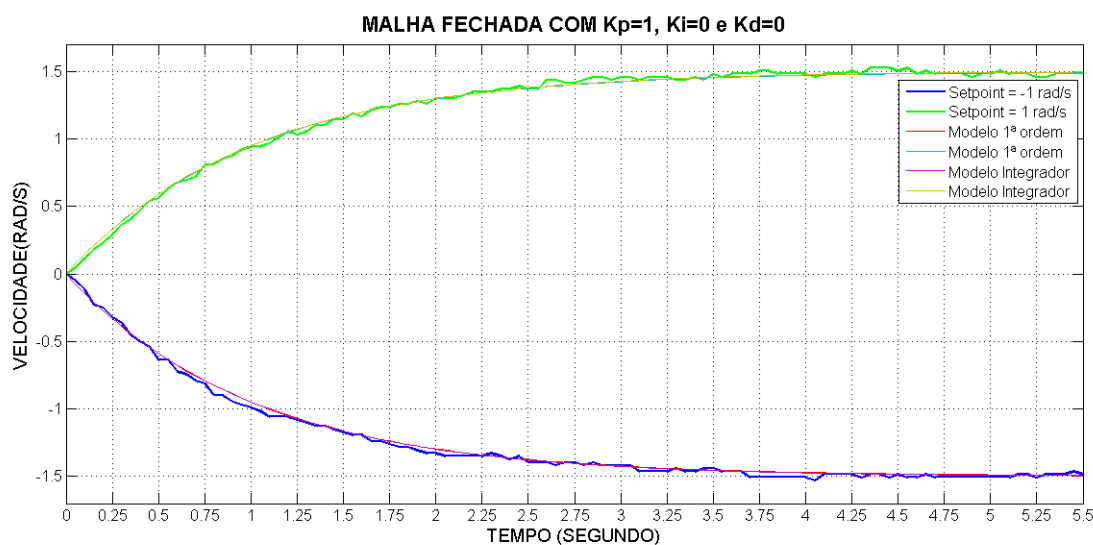


Figura 18 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 2: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 3:

$$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$$

$$K_p = 5.$$

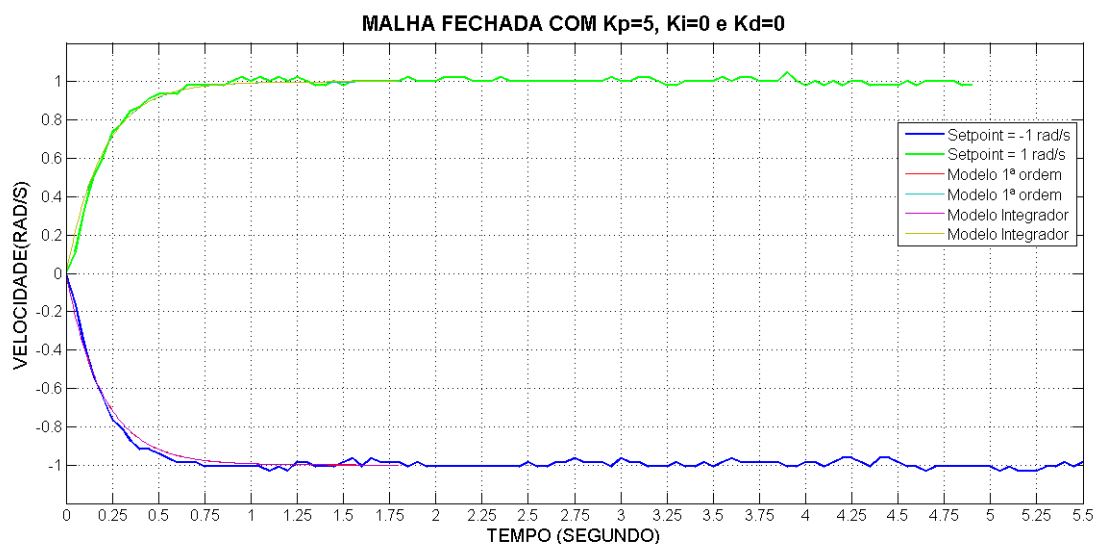


Figura 19 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 3: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 4:

$$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$$

$$K_p = 1.$$

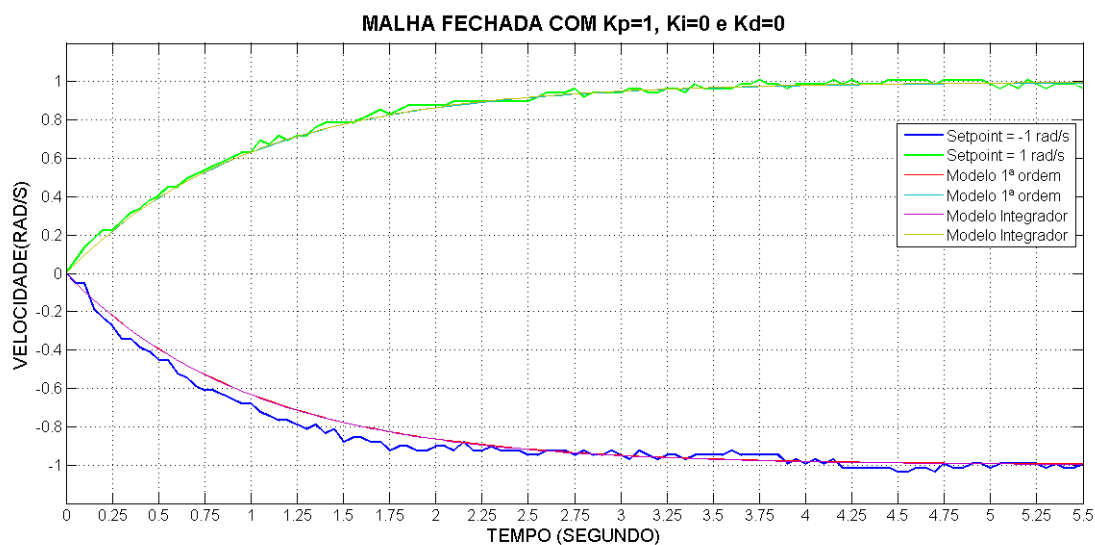


Figura 20 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 4: Motor Dynamixel MX-106R

- Ensaio 5:

$$r(t) = \pm 1 \text{ rad/s};$$

$$K_p = 5.$$

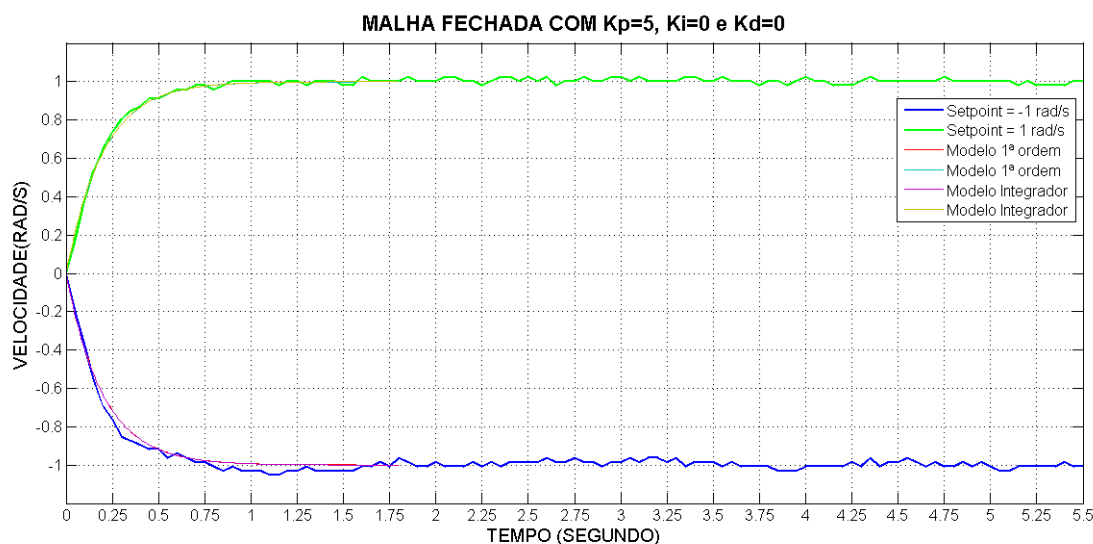


Figura 21 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental 5: Motor Dynamixel MX-106R

A partir das figuras apresentadas anteriormente, pode-se observar que o modelo calculado representa de forma satisfatória os ensaios reais, pois tanto o regime transitório quanto o regime permanente do ensaio real e da simulação estão próximos. Dessa forma, pode-se utilizar as funções de transferências calculadas para aplicar o controle PID.

5.1.3 PROJETO DO CONTROLADOR DO MOTOR DYNAMIXEL MX-106R

Uma vez que calculou-se a transformada de Laplace da equação que representa o modelo dinâmico do motor Dynamixel MX-106R, possibilitou a realização do projeto do controlador PID deste motor.

Considerando que a malha de controle interna deve ter tempo de acomodação igual a 0.5 segundos, pois caso uma resposta mais rápida fosse solicitada os atuadores poderiam ser sobrecarregados e danificados. Outra solicitação foi que não deveria haver erro da resposta em malha fechada. Dessa forma, por o sistema em malha aberta ser do tipo integrador, notou-se que os controlador proporcional seria suficiente para atender as especificações.

O ganho do controlador proporcional foi calculado com o auxílio das seguintes equações:

Seja o sistema composto pelo motor Dynamixel MX-106R $G(s)$ e seu controlador interno $C(s)$, a relação entre a saída e entrada do sistema será:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad \text{Sendo } C(s) = K_p \quad (5.7)$$

Considerando que o pólo desejado (Pd) de malha fechada do sistema para atingir o tempo de acomodação (ts) desejada no critério de 2%, pode ser calculado pela seguinte equação:

$$ts(2\%) = \frac{4}{Pd} \quad (5.8)$$

Logo:

$$Pd = \frac{4}{ts} \quad (5.9)$$

Substituindo na equação 5.7 $G(s) = \frac{K}{s}$ teremos:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{KKp}{s + KKp} \quad (5.10)$$

Observando a equação 5.10, pode-se dizer que $Pd = KKp$, logo o ganho do controlador proporcional pode ser calculado por:

$$Kp = \frac{Pd}{K} \quad (5.11)$$

Utilizando a equação 5.9 para calcular o local do pólo desejado e posteriormente a equação 5.11, calculou-se o valor do ganho proporcional indicado para as especificações do projeto em questão. Desta forma encontrou-se:

$$Kp = 13,32$$

5.2 ROBÔ

O Robô IROs, feito pela SENAI-CIMATEC em parceria com a CEMIG, deverá inspecionar linhas de transmissão. Para realizar esta atividade o movimentos de suas juntas devem ser precisas, de forma que a posição final de cada uma dessas juntas seja a posição de referência do controlador. Dessa forma projetou-se um controlador PID com o objetivo de atingir as especificações de movimento desejada (SENAI - CIMATEC, 2013).

Algumas das características do robô IROs são (SENAI - CIMATEC, 2013):

- Comunicação digital através de interface em rede RS-485;
- Controlador PID com parâmetros configuráveis;

- Encoder magnético absoluto com resolução de 16 bits.

De acordo com [SENAI - CIMATEC \(2013\)](#), o robô IROS será controlado a partir do ROS, utilizando-se interface de comunicação serial.

5.2.1 MODELAGEM DO ROBÔ CEMIG

Com o propósito de obter o modelo matemático do robô, realizou-se uma série de ensaios experimentais. Os ensaios tem a finalidade de auxiliar na modelagem matemática e em obter a transformada de Laplace da relação entre os sinais de saída e entrada do robô. Dessa forma, pode-se conseguir a função de transferência e posteriormente aplicar ações de controle PID no sistema.

Por medidas de segurança, a modelagem do sistema foi realizada em malha fechada, mas atribuindo valor igual a zero aos ganhos integral e derivativo no controlador de posição da junta. Usou-se apenas o ganho proporcional do controlador com valor diferente de zero. Desta forma, foi estimado uma função de transferência em malha aberta para o servomotor a partir de uma função de transferência em malha fechada inicialmente calculada.

Conforme [Astrom e Hagglund \(1995\)](#), ensaios experimentais para obtenção de modelos devem ser repetidos variando a amplitude do sinal de entrada e as condições de operação. Visando atender esta recomendação e buscando-se também verificar a linearidade entre as diferentes regiões de operação do robô, os seguintes parâmetros foram modificados a cada experimento:

- Posições de operação (*signal de entrada do controlador*);
- Ganho proporcional do controlador;

Realizou-se oito ensaios experimentais. O sistema equivalente ao testado pode ser observado na figura 10 e as características e resultados de cada um dos ensaios foram:

- Ensaio 1:

$$r(t) = -0.7 \text{ rad};$$

$$K_p = 0.5.$$

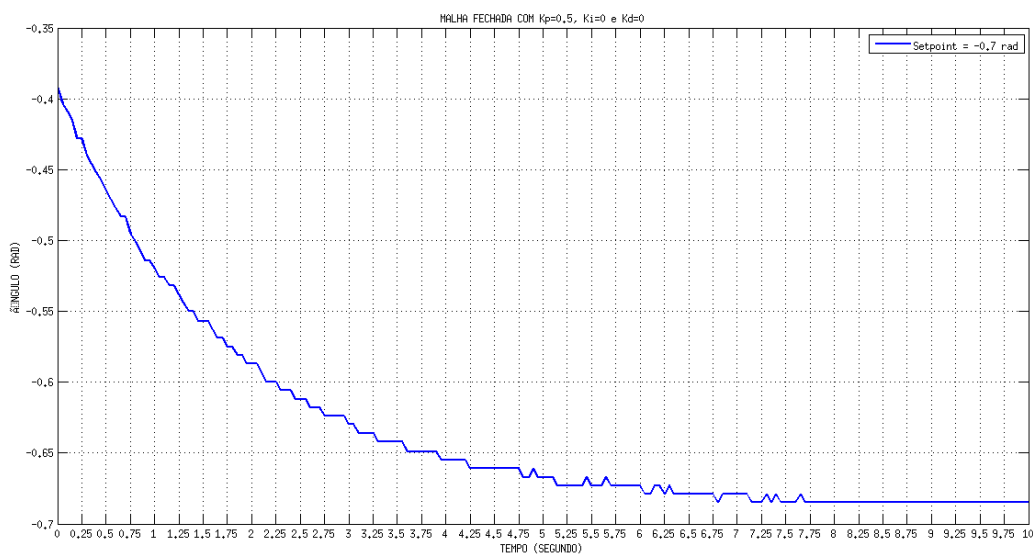


Figura 22 – Ensaio Experimental Robô 1: Junta Robótica IROs

- Ensaio 2:

$$r(t) = -0.2 \text{ rad};$$

$$K_p = 0.5.$$

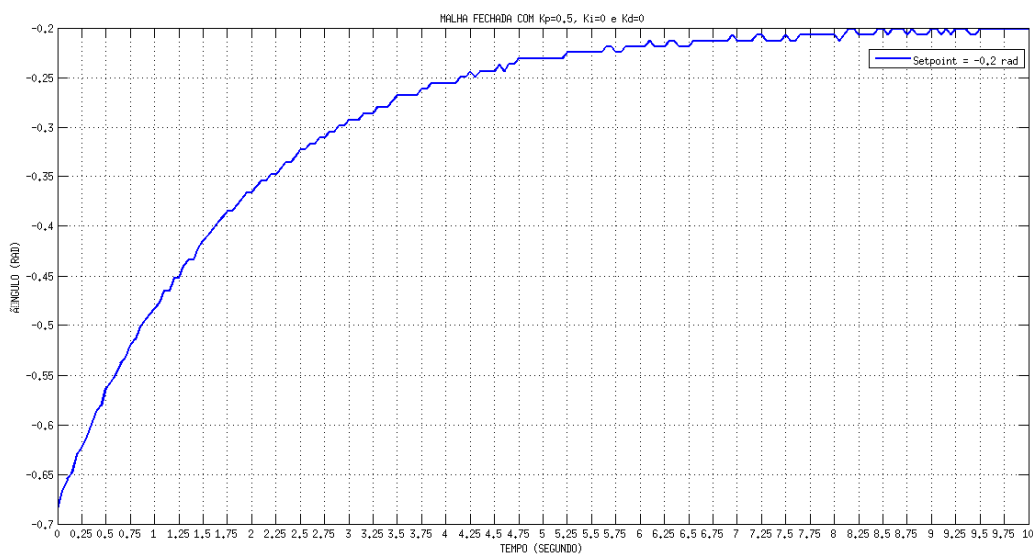


Figura 23 – Ensaio Experimental Robô 2: Junta Robótica IROs

- Ensaio 3:

$$r(t) = -0.9 \text{ rad};$$

$$K_p = 1.5.$$

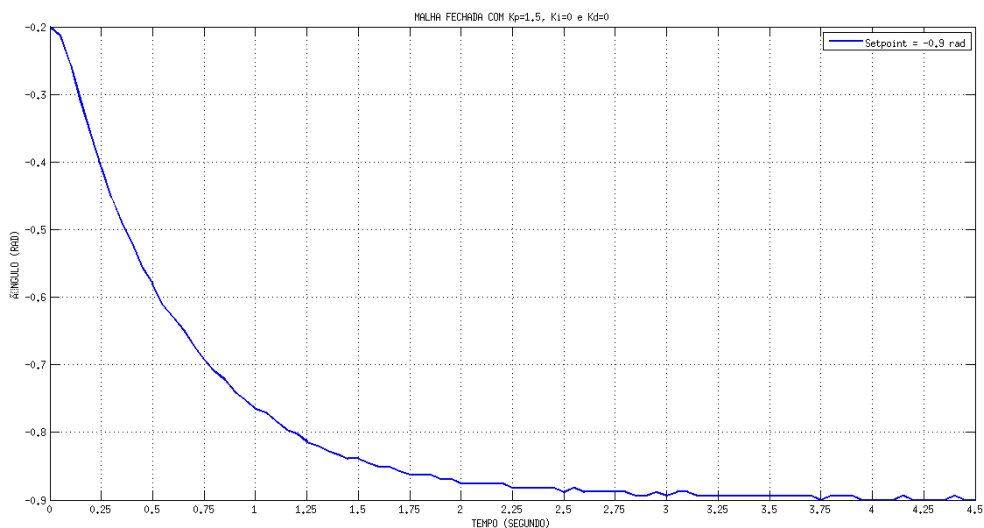


Figura 24 – Ensaio Experimental Robô 3: Junta Robótica IROs

- Ensaio 4:

$$r(t) = -0.5 \text{ rad};$$

$$K_p = 1.5.$$

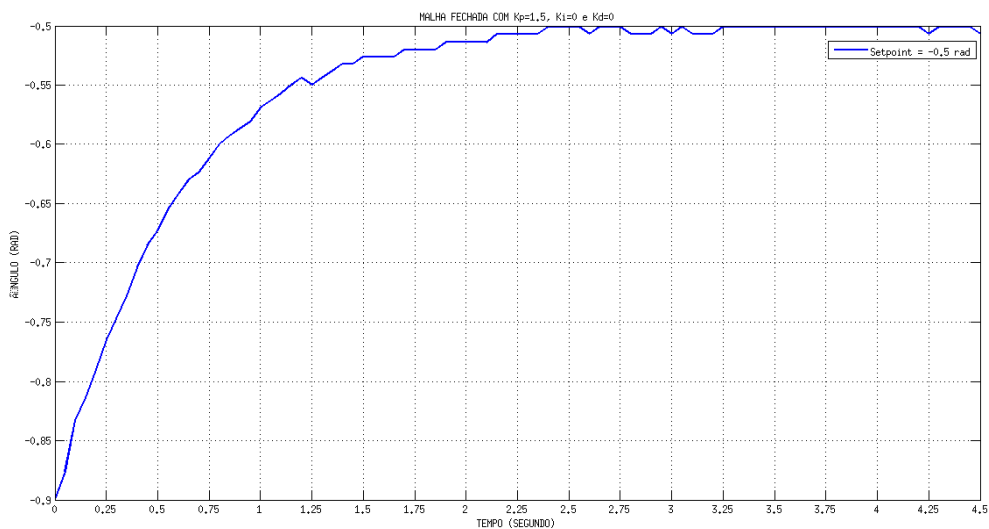


Figura 25 – Ensaio Experimental Robô 4: Junta Robótica IROs

- Ensaio 5:

$$r(t) = -0.5 \text{ rad};$$

$$K_p = 3.$$

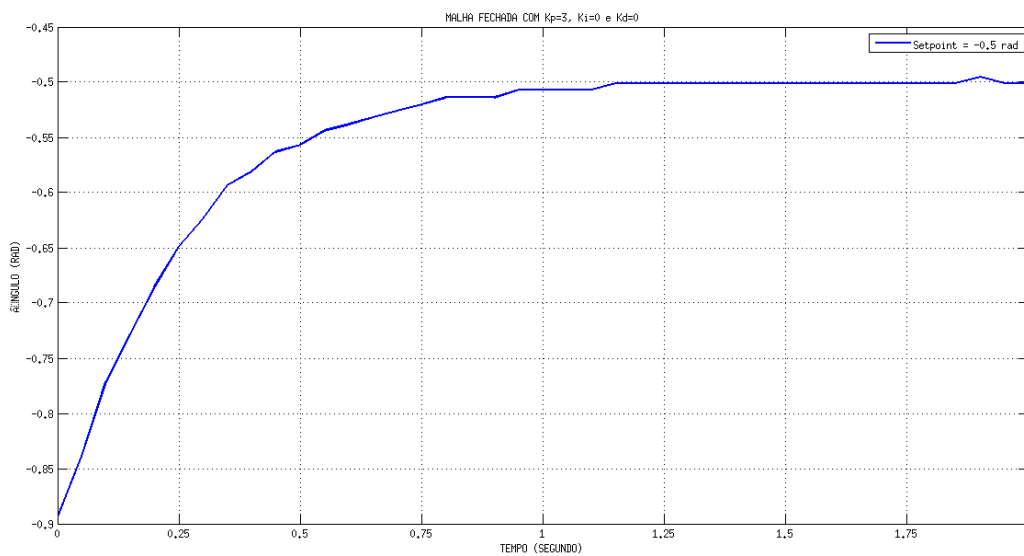


Figura 26 – Ensaio Experimental Robô 5: Junta Robótica IROS

- Ensaio 6:

$$r(t) = -0.9 \text{ rad};$$

$$K_p = 3.$$

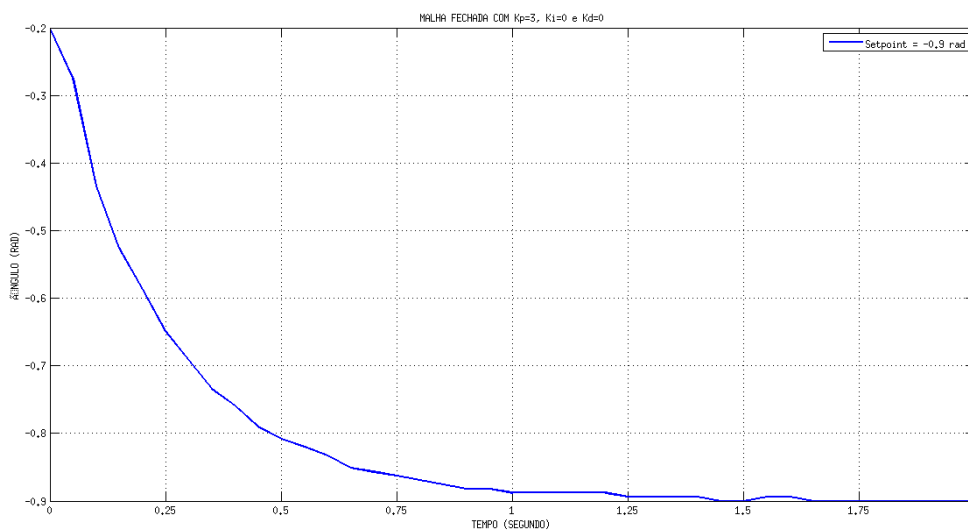


Figura 27 – Ensaio Experimental Robô 6: Junta Robótica IROS

- Ensaio 7:

$$r(t) = -0.2 \text{ rad};$$

$$K_p = 4.$$

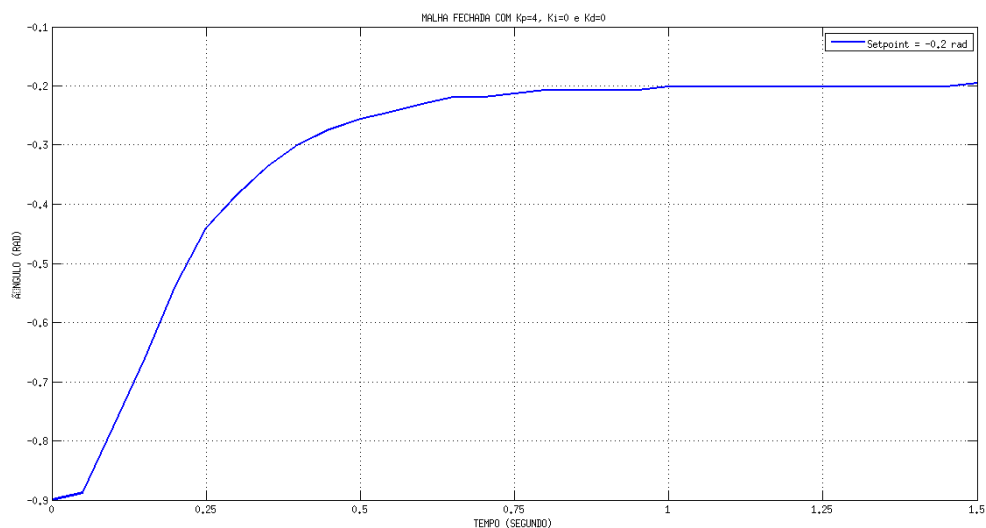


Figura 28 – Ensaio Experimental Robô 7: Junta Robótica IROs

- Ensaio 8:

$$r(t) = -0.9 \text{ rad};$$

$$K_p = 4.$$

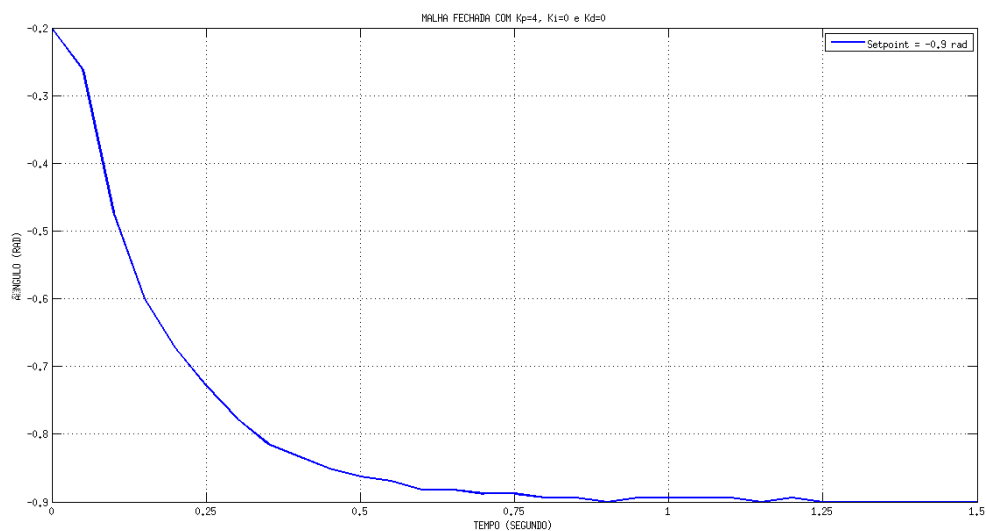


Figura 29 – Ensaio Experimental Robô 8: Junta Robótica IROs

A partir das curvas obtidas nesta seção, foi calculado um modelo em malha fechada para o sistema. Nota-se que o sistema é semelhante a um sistema de 1ª ordem.

Conforme informado nas seções anteriores, os ensaios foram realizados em um sistema de malha fechada com realimentação unitária ($H(s) = 1$) semelhantes à figura 10. Logo, uma função de transferência em malha aberta de primeira ordem foi calculado a partir de um modelo em malha fechada a seguir semelhante a equação 5.1.

A partir da aproximação da FTMF do robô por um sistema de primeira ordem, utilizou-se os conceitos e equações apresentados na seção 5.1.1.1, possibilitando realizar uma estimativa para a FTMA do robô. Desta forma, a melhor equação que descreve os movimento do robô CEMIG em malha aberta é:

$$G(s) = \frac{72,09}{1 + 67,48s}$$

5.2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DO ROBÔ CEMIG

A partir do cálculo do modelo em malha aberta por uma aproximação de primeira ordem, realizou-se simulação computacional no software Matlab buscando reproduzir as mesmas condições dos ensaios experimentais. Dessa forma, utilizou-se a FTMA calculada do robô e a FT do controlador configurado com o mesmo parâmetro utilizado no experimento.

O resultado da simulação computacional do modelo de malha aberta do robô IRoS quando submetido às mesmas condições do ensaio experimental pode ser visto nas figuras a seguir:

- Ensaio 1:
 $r(t) = -0.7$ rad;
 $K_p = 0.5$.
- Ensaio 2:
 $r(t) = -0.2$ rad;
 $K_p = 0.5$.
- Ensaio 3:
 $r(t) = -0.9$ rad;
 $K_p = 1.5$.
- Ensaio 4:
 $r(t) = -0.5$ rad;
 $K_p = 1.5$.

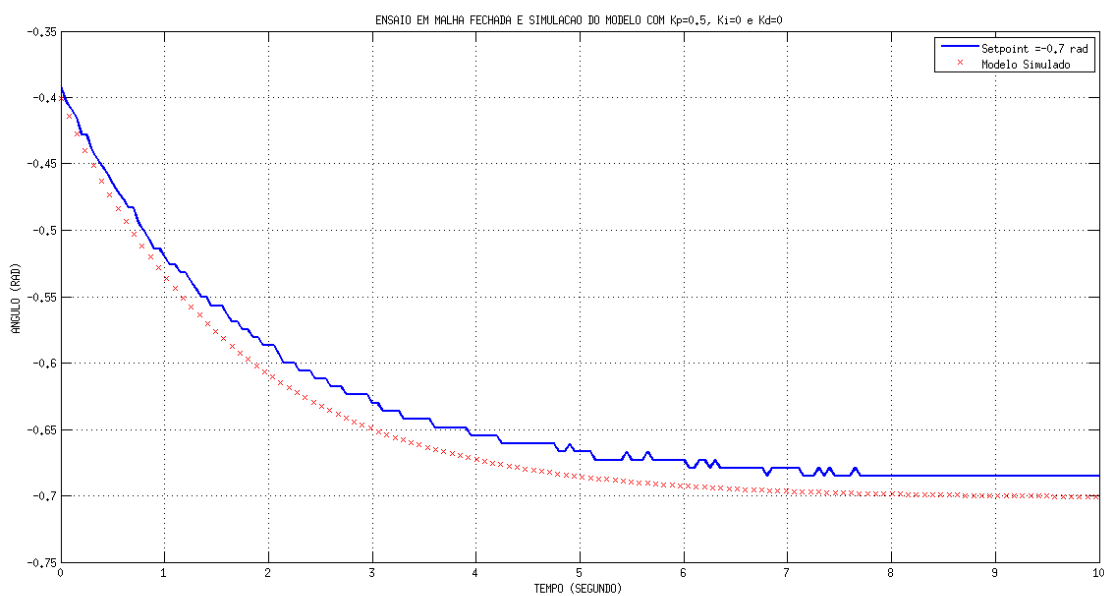


Figura 30 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 1: Junta Robótica

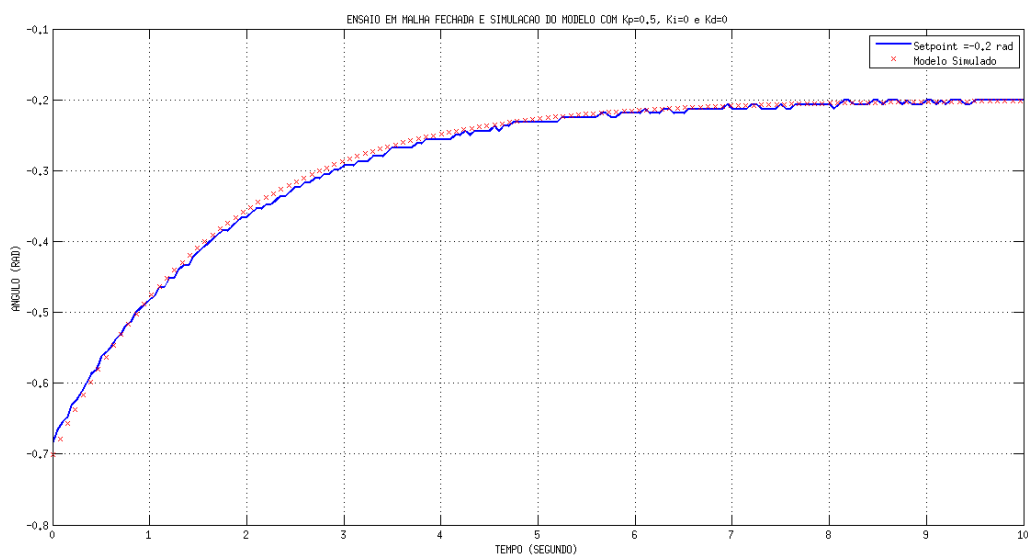


Figura 31 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 2: Junta Robótica

- Ensaio 5:

$$r(t) = -0.5 \text{ rad};$$

$$K_p = 3.$$

- Ensaio 6:

$$r(t) = -0.9 \text{ rad};$$

$$K_p = 3.$$

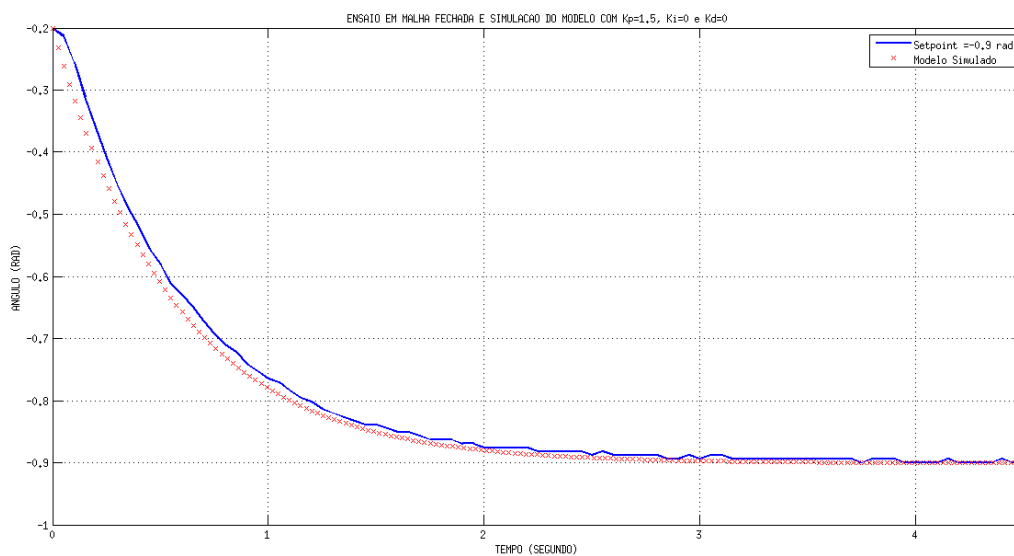


Figura 32 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 3: Junta Robótica

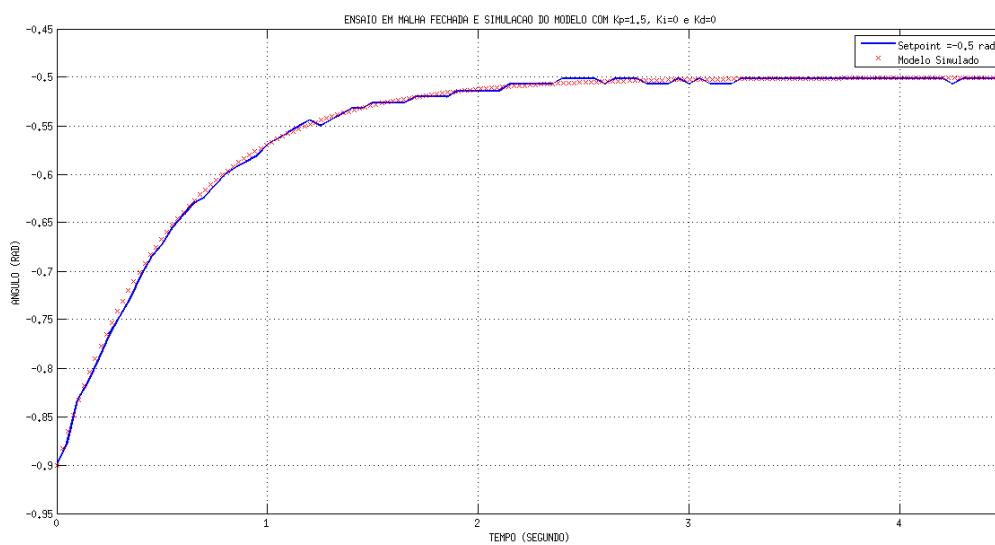


Figura 33 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 4: Junta Robótica

- Ensaio 7:

$$r(t) = -0,2 \text{ rad};$$

$$K_p = 4.$$

- Ensaio 8:

$$r(t) = -0,9 \text{ rad};$$

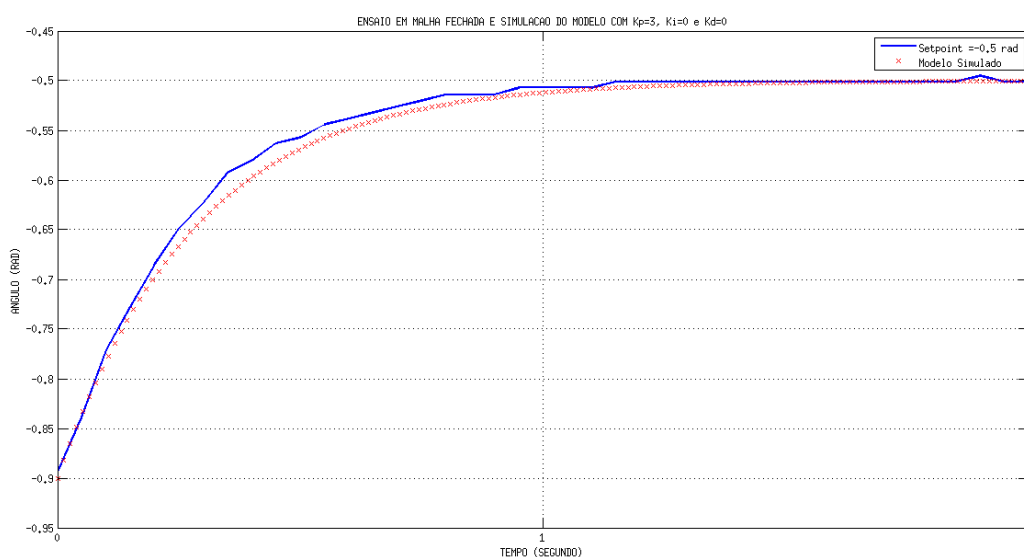


Figura 34 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 5: Junta Robótica

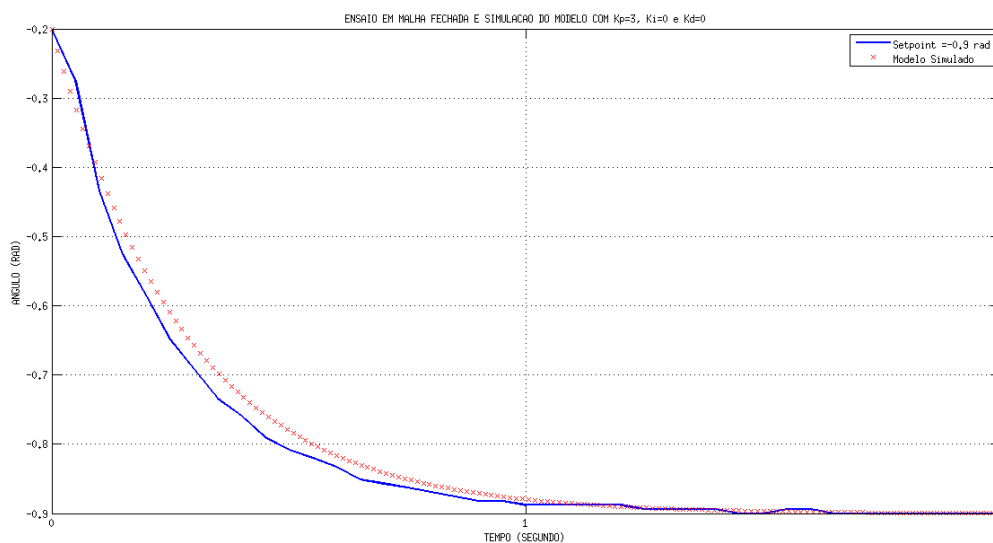


Figura 35 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 6: Junta Robótica

$$K_p = 4.$$

A partir das figuras apresentadas anteriormente, pode-se observar que o modelo calculado representa de forma satisfatória os ensaios reais, pois tanto o regime transitório quanto o regime permanente do ensaio real e da simulação estão próximos. Dessa forma, pode-se utilizar as funções de transferências calculadas para aplicar o controle PID no sistema robótico.

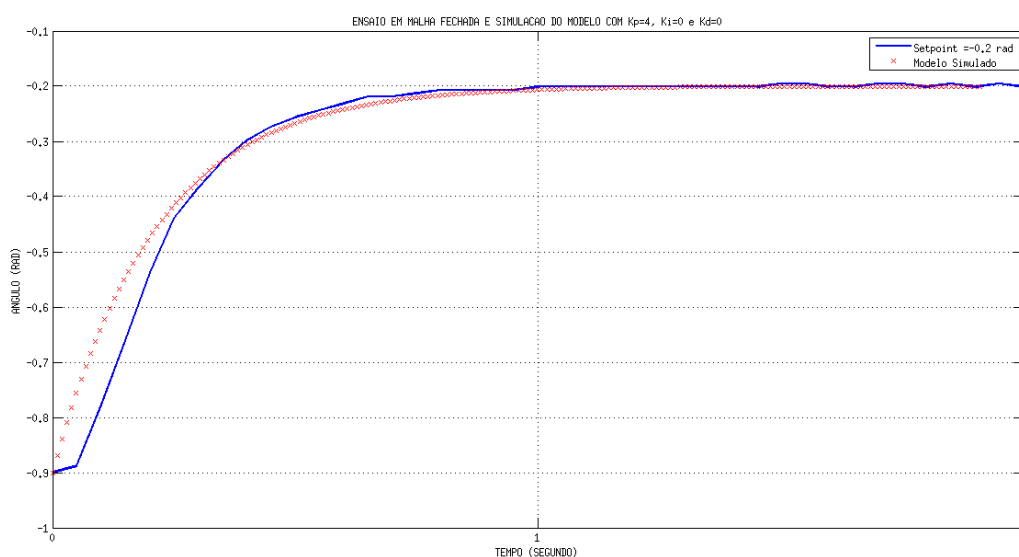


Figura 36 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 7: Junta Robótica

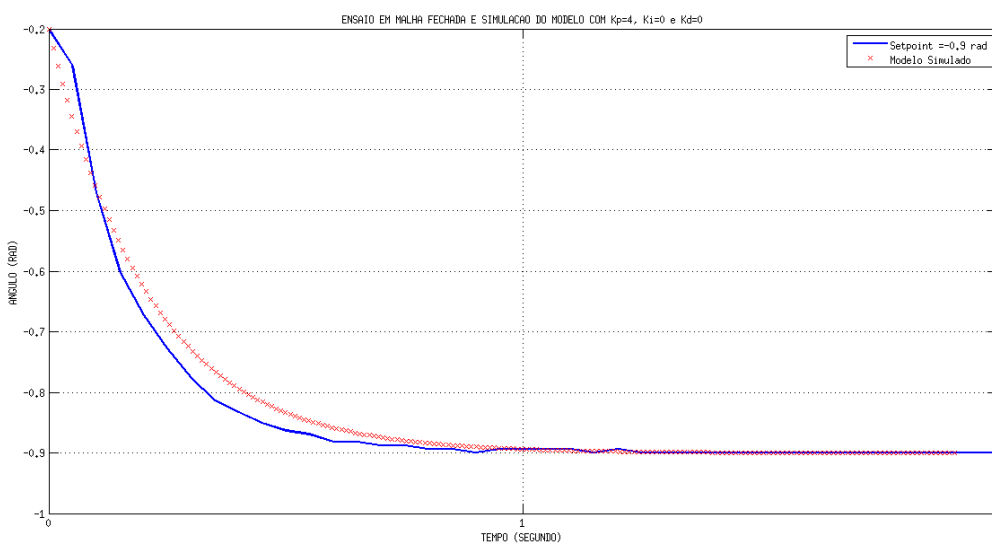


Figura 37 – Comparação entre Simulação e Ensaio Experimental Robô 8: Junta Robótica

5.2.3 PROJETO DO CONTROLADOR DO ROBÔ IRoS

Uma vez que foi calculada a transformada de Laplace da equação que representa o modelo dinâmico do robô, realizou-se então o projeto do controlador PID, buscando atender os seguintes requisitos:

- Tem de acomodação de aproximadamente 5 segundos;
- Erro de posição em regime permanente menor que 1%.

Desta forma, utilizou-se as equações 5.7, 5.8 e 5.9 apresentadas na seção 5.1.3, no entanto, neste caso utilizando $G(s) = \frac{K}{1+\tau s}$ tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{\frac{KKp}{1+\tau s}}{1 + \frac{KKp}{1+\tau s}} \\ \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{KKp}{\tau s + 1 + KKp} \\ \frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{\frac{KKp}{1+KKp}}{1 + \frac{\tau}{1+KKp}s}\end{aligned}\quad (5.12)$$

Desta forma, sendo:

$$Pd = \frac{1 + KKp}{\tau}$$

e

$$Pd = \frac{4}{ts}$$

Logo:

$$Kp = \frac{\frac{4}{ts}\tau - 1}{K}\quad (5.13)$$

Utilizando as equações apresentadas anteriormente e as especificações do projeto, encontrou-se:

$$Kp = 0,664$$

Utilizando o controlador proporcional com ganho de valor 0,664 no sistema identificado anteriormente, pode-se observar a resposta ao degrau na figura a seguir.

A partir das figuras 38 e 39 observa-se que o sistema controlado atende ao tempo de acomodação e ao erro de regime permanente desejado pelas especificações do projeto.

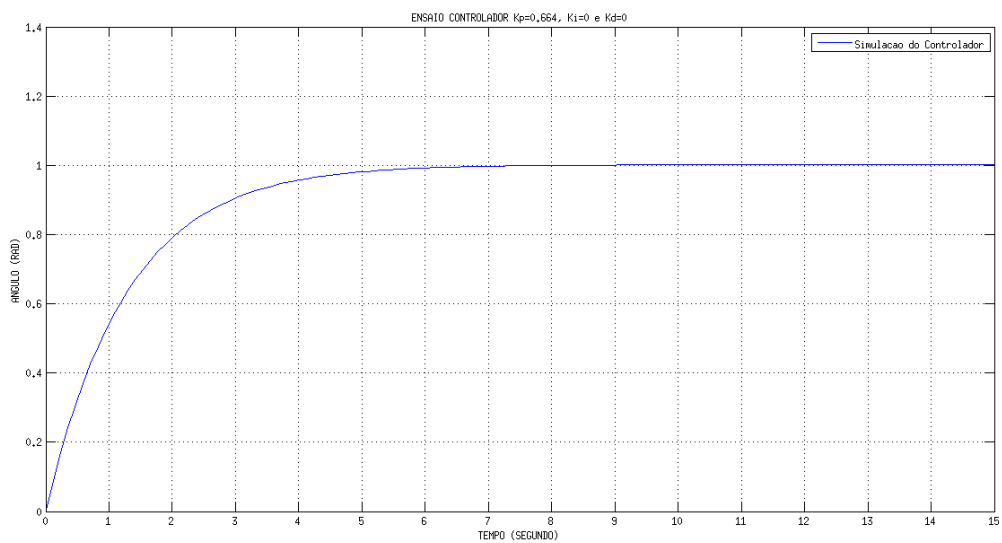


Figura 38 – Simulação do Controlador: Visualização do tempo de acomodação

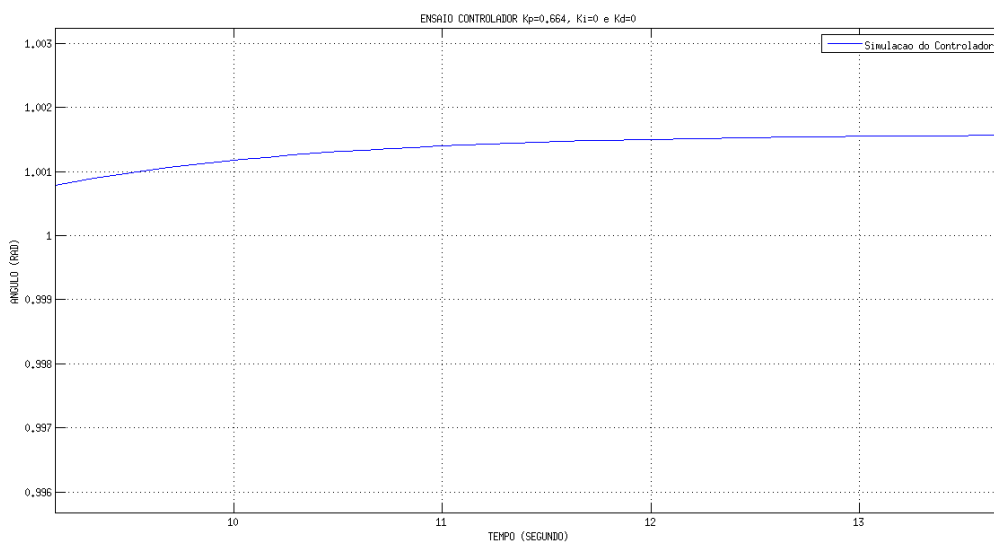


Figura 39 – Simulação do Controlador: Visualização do erro em regime permanente

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho permitiu obter conclusões com relação a modelagem do robô IROS desenvolvido pelo SENAI-CIMATEC em parceria com a CEMIG. Posteriormente a modelagem foi aplicado uma lei de controle ao sistema e foi observado o seu desempenho.

Foi possível verificar que os modelos encontrados, tanto para a malha interna quando para a malha externa do sistema apresentaram desempenho satisfatório, logo as funções de transferências calculadas, quando submetidas às mesmas condições de teste, apresentavam saída semelhante aos experimentos. Desta forma, segundo as simulações apresentadas, todos os movimentos podem ser realizados dentro das especificações do projeto.

Apesar do bom desempenho encontrado nos teste com os modelos encontrados, sabe-se que existe algumas desvantagens em técnicas de modelagem offline dos robôs, pois a alteração da lubrificação, peso ou algumas outras características podem modificar o sistema e consequentemente o seu modelo.

Para trabalhos futuros, sugere-se a criação de um ambiente de modelagem online no framework ROS. Este ambiente poderia modelar o sistema em intervalos de tempo periódicos e consequentemente garantir uma maior confiabilidade ao robô. Outro possível trabalho é codificar os algoritmo de modelagem para um sistema *open source*.

REFERÊNCIAS

- ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. [S.l.]: Research Triangle Park, 1995. Citado nas páginas 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 34 e 44.
- DEBENEST, P. et al. Expliner-robot for inspection of transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 3978–3984. Citado nas páginas 13 e 16.
- ENERGÉTICA, E.-E. de P. Balanço energético nacional 2013, ano base 2012. 31 pg. https://ben.epe.gov.br/downloads/S%20C3%ADntese%20do%20Relat%20C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf, 2013. Citado na página 16.
- FULLER, J. L. *Robotics: Introduction, Programming and Projects*. [S.l.]: Prentice Hall, 1999. Citado na página 15.
- IKONEN, E.; KADDOUR, N. *ADVANCED PROCESS IDENTIFICATION AND CONTROL*. [S.l.]: Marcel Dekker, 2002. Citado na página 22.
- ISHINO, R.; TSUTSUMI, F. Detection system of damaged cables using video obtained from an aerial inspection of transmission lines. In: IEEE. *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*. [S.l.], 2004. p. 1857–1862. Citado na página 16.
- OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. Citado nas páginas 21, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 34.
- ROSÁRIO, J. M. *Princípios de mecatrônica*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2006. Citado na página 12.
- SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modelling and Control of Robot Manipulators*. [S.l.]: Springer, 1999. Citado na página 15.
- SENAI - CIMATEC. *Memorial Descritivo - Robô de Inspeção de Linhas Vivas de 138 kV*. 1. ed. Avenida Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador, BA, 2013. Citado nas páginas 17, 18, 19, 20, 33, 34, 43 e 44.
- SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer handbook of robotics*. [S.l.]: Springer, 2008. Citado na página 19.
- SILVEIRA, P. R. da; SANTOS, W. E. dos. *Automação e controle discreto*. [S.l.]: Érica, 2004. Citado na página 15.
- TOUSSAINT, K.; POULIOT, N.; MONTAMBAULT, S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, Wiley Online Library, v. 26, n. 5, p. 477–499, 2009. Citado na página 16.
- WITTENSTEIN. *Backlash vs. Lost Motion*. 2006. Disponível em: <<http://www.wittenstein-us.com/tech-support/resources/documents/Backlashvs.LostMotion.pdf>>. Acesso em: 13.02.2014. Citado na página 19.