

Luiz Henrique Silva Lelis

**Implementação de técnica de controle em um
manipulador robótico utilizando o conceito de
*Hardware in the Loop***

Belo Horizonte

2019, v1

Luiz Henrique Silva Lelis

**Implementação de técnica de controle em um
manipulador robótico utilizando o conceito de *Hardware
in the Loop***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Minas Gerais para
obtenção do Título de Bacharel em Engenha-
ria de Controle e Automação pela Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Orientador: Luciano Antonio Frezzatto Santos

Belo Horizonte

2019, v1

Resumo

A técnica *Hardware in the Loop* (HIL) é fundamental para simulações em tempo real a fim de conectar uma parte do sistema a um modelo digital. A técnica consiste na inserção de um dispositivo físico na malha de controle durante o desenvolvimento do sistema. Atualmente, as simulações HIL são utilizadas principalmente para o desenvolvimento de novos componentes e atuadores em vários campos diferentes como: simulações de voo, sistemas eletrônicos de potência, robótica móvel e engenharia de tráfego. No sistema estudado nesta monografia, a técnica HIL é aplicada a um manipulador robótico simplificado com três juntas de revolução. O método foi aplicado em três etapas distintas: a primeira consiste no levantamento do modelo da planta e sintonia do controlador em ambiente de simulação; a segunda na substituição do controlador virtual por sua implementação em dispositivo físico seguido da validação em conjunto com o ambiente de simulação; por fim, a última etapa corresponde à utilização do controlador implementado no dispositivo físico comunicando diretamente com a planta real. O projeto faz uso do computador de placa única *Raspberry Pi* como o Hardware inserido na malha de controle do manipulador. Finalmente, destaca-se como objetivo do projeto a sintonia e validação do controle de juntas independentes do manipulador em questão aplicando a técnica HIL.

Palavras-chave: *Hardware in the Loop*, manipulador robótico, controle, juntas independentes.

Abstract

The Hardware in the Loop (HIL) technique is fundamental for real-time simulations in order to connect a part of the system to a digital model. The technique consists in the insertion of a physical device in the control loop during the system's development. Currently, HIL simulations are mainly used for the development of new components and actuators in several fields such as: flight simulations, electronic power systems, mobile robotics and traffic engineering. For the system studied in this monography, the HIL technique is applied to a simplified robotic manipulator with three revolute joints. The method was applied in three distinct steps: the first one consists in surveying the plant model and tuning the controller in a simulation environment; the second is the replacement of the virtual controller by its implementation in a physical device followed by the validation within the simulation environment; finally, the last step corresponds to the use of the controller implemented in the physical device communicating directly with the actual plant. The project makes use of the single board computer Raspberry Pi as the hardware inserted into the loop of the manipulator's control. Finally, an independent joint control for the manipulator applying, applying the HIL technique.

Keywords: Hardware in the Loop, robotic manipulator, control, independent joints.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada	12
Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada - <i>Hardware in the Loop</i>	12
Figura 3 – Planta utilizada - manipulador de três juntas revolutas	16
Figura 4 – Diagrama do ensaio em malha aberta	26
Figura 5 – Diagramas das etapas da técnica <i>Hardware-in-the-loop</i>	28
Figura 6 – Gráfico da representação <i>Denavit-Hartenberg</i> obtida	29
Figura 7 – Gráficos da entrada e resposta para o ensaio em MA de cada uma das juntas	31
Figura 8 – Gráficos da entrada e resposta do modelo obtido para cada uma das juntas	32
Figura 9 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 1	34
Figura 10 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 2	37
Figura 11 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 3	38

Lista de tabelas

Tabela 1 – Constantes determinadas para os modelos das juntas	31
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

DH	<i>Denavit-Hartenberg</i>
DOF	<i>Degree-of-freedom</i>
EL	<i>Euler-Lagrange</i>
HIL	<i>Hardware in the Loop</i>
MA	Malha aberta
MF	Malha fechada
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PPP	Prismática Prismática Prismática
RPP	Rotacional Prismática Prismática
RRP	Rotacional Rotacional Prismática
RRR	Rotacional Rotacional Rotacional
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

Lista de símbolos

$\ddot{q}_n, \dot{q}_n, q_n$	aceleração , velocidade e variável generalizadas da junta n
θ_i	ângulo da junta i
ξ	coeficiente de amortecimento
r_{ci}	coordenada do centro de massa do elo i
g	constante de gravidade
τ, T_d, T_i	constante de tempo do sistema de primeira ordem, tempo derivativo e tempo integral
ρ	densidade de massa
d_i	deslocamento do elo
d_{kj}	elemento da matriz $D(q)$
d_{ki}	elemento da matriz $D(q)$
d_{ij}	elemento da matriz $D(q)$
c_{ijk}	elemento da matriz de Coriolis
ϕ_k	elemento da matriz $g(q)$ obtido da energia potencial, relativo à força generalizada aplicada k
K	energia cinética
P	energia potencial
P_i	energia potencial do elo i
ω_n	frequência natural não amortecida
τ_i	força generalizada aplicada na junta i
K_p	ganho proporcional
α_i	giro do elo
J_i, J_ω, J_v	Jacobianos da junta i , relativo à velocidade angular e relativo à velocidade linear
m_i	massa do elo i

$D(q)$	matriz da equação dinâmica que incorpora a energia cinética do manipulador
ζ	matriz das velocidades linear e angular
I	matriz de inércia
R	matriz de rotação
R_n^0	matriz de rotação do elo n em relação à base
A_i	matriz de transformação homogênea do elo i
T_n^0	matriz de transformação homogênea do elo n em relação à base
o_n^0	matriz de translação do órgão terminal em relação à base $C(q, q)$
$C(q, \dot{q})$	matriz que incorpora os símbolos de Christoffel
$g(q)$	matriz que incorpora a energia potencial do manipulador
a_i	tamanho do elo
Γ	tensor de inércia
ω, ω_n^0	velocidades angular e angular do elo n em relação à base
v, v_n^0	velocidades linear e linear do elo n em relação à base

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação e Justificativa	13
1.2	Objetivos do Projeto	13
1.3	Local de Realização	13
1.4	Estrutura da Monografia	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Manipuladores Robóticos	15
2.2	Sistemas de Controle	16
2.3	Técnica <i>Hardware in the Loop (HIL)</i>	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Desenvolvimento da solução para o modelo da planta	19
3.1.1	Convenção de <i>Denavit-Hartenberg</i>	20
3.1.1.1	Cinemática Diferencial e o Jacobiano	21
3.1.2	Equações de <i>Euler-Lagrange</i>	23
3.1.2.1	Energia cinética para um manipulador de n elos	23
3.1.2.2	Energia potencial para um manipulador de n elos	24
3.1.2.3	Equações de movimento	25
3.2	Ensaio em malha aberta para a obtenção do modelo da planta	25
3.3	Projeto de sistemas de controle pelo método do lugar das raízes	27
3.4	Configuração do ambiente de simulação	27
3.5	Resumo do Capítulo	27
4	RESULTADOS	29
4.1	Ensaio em malha aberta	30
4.2	Fase 1 da técnica HIL - Planta e controlador simulados	32
4.3	Fase 2 da técnica HIL - Planta simulada, controlador real	34
4.4	Fase 3 da técnica HIL - Planta e controlador reais	37
4.5	Resumo do Capítulo	39
5	CONCLUSÃO	40
	Referências Bibliográficas	42
	Referências	42

ANEXOS	44
ANEXO A – OBTENÇÃO DO MODELO ATRAVÉS DA CONVENÇÃO DE <i>DENAVIT-HARTENBERG</i> E EQUAÇÕES DE <i>EULER-LAGRANGE</i>	45

1 Introdução

Um sistema pode ser visto como um processo com sinais de entrada que são transformados ou induzidos a responder de alguma forma resultando em outros sinais de saída (OPPENHEIN; WILLSKY, 1997). O intuito do controlador é manipular o sistema com a finalidade de obter um sinal de saída que siga uma referência pré estabelecida. Para isso, é necessário, primeiramente, obter um modelo que descreva o comportamento do sistema e, em seguida, projetar uma estratégia de controle a partir desse modelo. Dentre as técnicas utilizadas para modelagem cabe destacar a descrição do sistema por meio de equações diferenciais lineares (OGATA, 2010) ou a identificação de subsistemas (AGUIRRE, 2015).

No controle em malha aberta, a saída não exerce nenhuma influência sobre o sinal de controle. Dessa forma, um sinal de controle é aplicado à entrada de uma planta ou de um processo de modo que a variável controlada atinja um valor pré-estabelecido; entretanto, esse valor resultante na saída não é utilizado para modificar a entrada. O problema deste tipo de controle é que o sistema pode mudar seu ponto de operação, por exemplo, ao ocorrerem perturbações. Caso isso ocorra, a saída não terá o valor estabelecido anteriormente.

Ao fechar a malha, o sinal de saída passa a influenciar diretamente a ação de controle. Assim, o sistema passa a contar com uma malha de realimentação e o sinal observado na entrada do controlador é, agora, o erro entre a referência do sistema e a saída mensurada. O controlador, então, tende a minimizar o erro de modo a garantir que a saída do sistema seja igual a referência, como ilustrado na Figura 1. “Controlar a saída de uma planta ou de um processo por realimentação significa aplicar na sua entrada, após conveniente amplificação, o sinal resultante da diferença entre o valor desejado e o valor medido da saída (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011, p. 3).”

O controle em malha fechada utiliza a informação de como a variável controlada evolui para determinar o sinal de controle aplicado ao processo. Determinado o modelo da planta a ser controlada, o controlador é sintonizado de forma a atender especificações de projeto fornecidas, tais como: sobressinal máximo, tempo de acomodação, tempo de subida e a constante de tempo (no caso de sistemas de primeira ordem). Geralmente, uma vez sintonizado o controlador e validado seu desempenho em malha fechada da planta realimentada, passa-se à implementação prática do controle sem que haja uma prévia validação do comportamento do controlador quando implementado em dispositivo físico.

Uma das formas de se controlar uma planta é através da inclusão de um hardware real na malha de controle. Essa é a idéia básica da simulação *Hardware in the Loop*

(HIL), uma técnica bem estabelecida usada em projeto e avaliação de sistemas de controle (BACIC, 2005).

Essa técnica consiste em implementar um controlador previamente projetado e validado em um dispositivo físico e substituir o bloco de controle $C(s)$ (vide Figura 1) por esse dispositivo, como apresentado na Figura 2. Ou seja, o sinal de erro $E(s)$ é transmitido para um dispositivo físico externo, o qual é responsável por determinar a ação de controle a ser aplicada ao modelo da planta em estudo $G(s)$. Em seguida, o sinal de controle calculado é enviado de volta para o ambiente de simulação, no qual a saída $Y(s)$, teórica, é determinada. O intuito é verificar se a estratégia de controle e o desempenho associado permanecem adequados antes de realizar o controle diretamente na planta real.

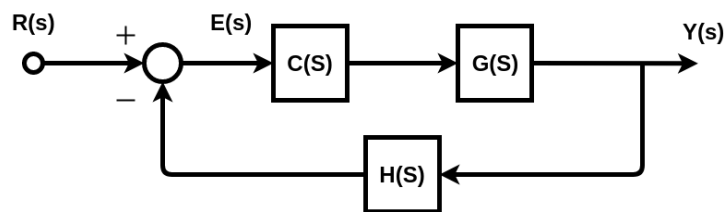


Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada

Fonte: Do autor

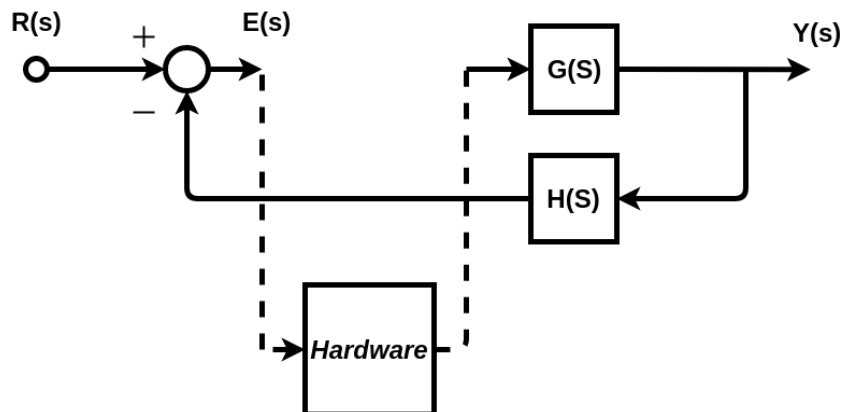


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada - *Hardware in the Loop*

Fonte: Do autor

A metodologia para síntese do controlador, validação e implementação na planta real possui três etapas distintas de execução. A etapa um consiste em levantar o modelo da planta que pretende-se controlar, e depois sintonizar um controlador em ambiente de simulação que atenda às condições de projeto previamente especificadas. A segunda etapa propõe substituir o controlador virtual por sua implementação em dispositivo físico e validar a implementação em conjunto com o ambiente de simulação. Por fim, a etapa três consiste na utilização do controlador implementado no dispositivo físico comunicando diretamente com a planta real.

1.1 Motivação e Justificativa

Quando os processos possuem uma dinâmica mais rápida que a execução do algoritmo para a ação de controle, surge um problema computacional complexo. Cumprir a restrição de reduzir o tempo de resposta exige um uso maior de simulações em tempo real (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999). Nos sistemas de tempo real, as tarefas consideradas críticas devem executar dentro de um período de tempo estabelecido. A utilização de um *Hardware* em uma malha de controle, conforme o método HIL propõe, possui um ganho em relação às simulações com sistemas operacionais comuns pelo motivo exposto acima.

Atualmente, as simulações HIL são utilizadas mais recorrentemente para o desenvolvimento de novos componentes e atuadores em vários campos diferentes (BOUSCAYROL, 2008). As aplicações ao longo da história têm demonstrado a variabilidade do uso da metodologia, aplicações estas como, sistemas eletrônicos de potência (ROTHSTEIN; SIEKMANN; STAUDT, 2017), sistemas de controle de voo (KARPENKO; SEPEHRI, 2006), engenharia de tráfego (BULLOCK et al., 2004) e robótica móvel (JAIN; KAMALI, 2016).

1.2 Objetivos do Projeto

O objetivo principal do presente projeto é sintonizar e validar estratégias de controle para o sistema dinâmico de um manipulador robótico utilizando a técnica *Hardware in the Loop* (HIL).

1.3 Local de Realização

Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG (DELT/UFMG). O departamento situa-se dentro do campus Pampulha da UFMG na Escola de Engenharia. O campus fica na Av. Presidente Antônio Carlos 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901.

O departamento foi criado em 1969 e tem contribuído para a formação dos engenheiros eletricitas e engenheiros de controle e automação da UFMG. O DELT é referência no cenário nacional e é, também, o Departamento da UFMG com maior participação no curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação.

1.4 Estrutura da Monografia

A monografia está dividida em cinco capítulos. Este capítulo apresentou uma introdução ao projeto e o local onde o trabalho foi realizado. O Capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica sobre os principais temas trabalhados no decorrer do projeto, como a

modelagem e controle de sistemas dinâmicos lineares, os conceitos da técnica *Hardware in the Loop* (HIL) e os princípios básicos do manipulador robótico. O Capítulo 3 aborda a metodologia de desenvolvimento do trabalho, ele descreve como o projeto foi desenvolvido explicitando o passo a passo das tarefas executadas para que o mesmo fosse concluído. Os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 4: primeiramente, o modelo da planta é obtido, depois um controlador é modelado em ambiente de simulação, o controlador é aplicado em um dispositivo físico para controlar a planta simulada, e por fim, a planta simulada é substituída pela planta real. Finalmente, no capítulo 5, tem-se a conclusão da monografia com algumas sugestões para trabalhos futuros e dificuldades encontradas na realização do projeto.

2 Revisão Bibliográfica

Esta monografia pretende validar estratégias de controle em um manipulador robótico por meio da técnica *Hardware in the Loop* (HIL). Por esse motivo, este capítulo aborda uma breve revisão dos principais aspectos que envolvem o tema proposto: manipuladores robóticos, sistemas de controle e HIL. Por clareza, esses tópicos são apresentados em seções distintas.

2.1 Manipuladores Robóticos

Um manipulador robótico pode ser definido como um mecanismo reprogramável e multifuncional que é desenvolvido para mover materiais, peças e ferramentas (MURPHY, 2000). Mecanismo este que é composto por elos e juntas mecânicas. Apesar disso, o manipulador não pode ser visto apenas como uma série de elos (ou *links*) em cascata. Para Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), o manipulador robótico é composto por um braço mecânico, pela ferramenta no fim do braço (também chamada ferramenta de trabalho), pela fonte de energia externa, pelos sensores externos e internos, pela interface de comunicação com o sistema e pelo controle do microcontrolador.

Na construção do manipulador, os elos são conectados por meio de juntas formando a cadeia cinemática. Segundo Paul (1981), ao incorporar coordenadas em cada elo do manipulador, usando transformação homogênea, é possível descrever a posição relativa e a orientação entre elas. A transformação homogênea corresponde a transformação de coordenadas que descreve a posição e a orientação do eixo da ferramenta de trabalho em relação à base (eixo 0) (SICILIANO et al., 2008).

As juntas podem ser tanto de revolução quanto prismáticas (PAUL, 1981). As juntas de revolução são aquelas que permitem um movimento de rotação entre um elo e outro. Por outro lado, as prismáticas são as que possibilitam apenas um movimento linear entre os elos.

A forma geométrica para se classificar os manipuladores é dada pela disposição das juntas na cadeia cinemática. Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), a maioria dos manipuladores se enquadra em uma das categorias a seguir (em que R corresponde a uma junta de revolução e P uma junta prismática): articulada (RRR), esférica (RRP), SCARA (RRP), cilíndrica (RPP), ou Cartesiana (PPP).

O grau de liberdade (DOF - *degree-of-freedom*) é um parâmetro fundamental para a configuração espacial do manipulador robótico. É esse parâmetro que define qual a dimensão do espaço de configuração, ou seja, um manipulador possui n graus de liberdade caso sua

configuração seja minimamente especificada por n parâmetros (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005). Para Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), a maioria dos manipuladores industriais atualmente possui seis ou menos graus de liberdade.

É importante ressaltar que a planta utilizada neste trabalho é um manipulador com três juntas revolutas. O manipulador real, possui outras duas juntas, uma para o punho e outra para a garra, entretanto estas foram desconsideradas para a modelagem e para o controle. Esse manipulador está representado na Figura 3 e também é conhecido na literatura como manipulador de cotovelos (*elbow manipulator*), articulado, revoluto, antropomórfico (*anthropomorphic manipulator*) ou manipulador RRR.

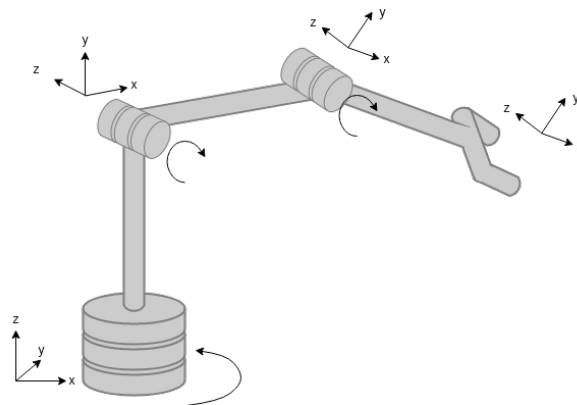


Figura 3 – Planta utilizada - manipulador de três juntas revolutas

Fonte: Do autor

2.2 Sistemas de Controle

Segundo Phillips e Nagle (2007), um controlador é necessário em uma planta para processar um sinal de erro de forma a atender certas especificações pré-definidas. Esse sinal de erro é dado pela diferença entre a resposta do sistema, determinada por um sensor, e a trajetória desejada. Dentre as especificações mais comuns em controle de sistemas dinâmicos lineares estão: rejeição do distúrbio, erro em estado estacionário e a resposta transiente (OGATA, 2010).

As variedades de controle se dão conforme os tipos de sinais existentes. Sinais analógicos são aqueles que apresentam valor em qualquer instante de tempo, os sinais discretos apresentam valores em instantes múltiplos do tempo de amostragem, e por fim, os sinais digitais são aqueles amostrados no tempo tendo sua amplitude representada por um número limitado de *bits*, ou seja, a amplitude sofre o efeito da quantização (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011). Geralmente, no projeto de controladores digitais, primeiro é realizado o projeto do controlador analógico, o qual é convertido, então, em digital para execução computacional. Por outro lado, existem também metodologias para a síntese

direta de controladores digitais, as quais podem fornecer melhores resultados quando comparadas ao método indireto. Todavia, essas últimas são menos utilizadas.

Nos dias atuais, o controlador mais utilizado na indústria é o controlador PID. Segundo Ogata (2010), mais da metade dos controladores industriais empregam o controle PID ou variantes. O seu sucesso está ligado diretamente a sua concepção robusta e sua aplicabilidade geral a maioria dos sistemas. O seu nome advém das componentes que definem a lei de controle, dada na Equação (2.1), a qual é composta pelas ações proporcional, integradora e derivativa (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011):

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

com:

- $u(t)$: sinal de saída do controlador, ou variável manipulada;
- $e(t)$: sinal de entrada do controlador, ou erro entre a resposta do sistema e o sinal de referência;
- K_p, T_i, T_d : parâmetros de ajustes do PID.

No escopo desta monografia, o controle PID será utilizado em conjunto com a técnica HIL apresentada na próxima subseção. Apesar disso, outras técnicas de controle podem ser igualmente empregadas seguindo a metodologia apresentada na monografia.

2.3 Técnica *Hardware in the Loop* (HIL)

A idéia básica da técnica HIL é a inclusão de uma parte do *hardware* real no *loop* de simulação durante o desenvolvimento do sistema (BASIC, 2005). Isto é, a técnica consiste em inserir um dispositivo físico na malha de controle de uma simulação. Nessa técnica, uma parte do sistema é integrada a uma outra parte que está sendo simulada em tempo real (ABOURIDA; DUFOUR; BELANGER, 2005).

Os primeiros usos da técnica HIL estão relacionados com as simulações de voo (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999). Utilizando essa técnica, a NASA realizou simulações de alta fidelidade para o desenvolvimento de tecnologias de aeronaves altamente manobráveis (EVANS; SCHILLING, 1984). Outras aplicações dessa técnica vieram posteriormente com os testes dinâmicos de componentes de veículos, como, por exemplo, suspensão e corpo do carro (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999).

Para Abourida, Dufour e Belanger (2005), a técnica *Hardware-in-the-Loop* (HIL) é fundamental para simulações em tempo real; não para simular o sistema completo em tempo real, mas sim para conectar uma parte do sistema a um modelo digital em tempo

real. Além disso, essa técnica de simulação tem como desafio o alcance da precisão de um modelo aceitável com um tempo de simulação digital viável (ABOURIDA; DUFOUR; BELANGER, 2005). Isso porque alguns sistemas (aqueles altamente não-lineares) precisam de uma frequência de amostragem muito alta para alcançarem uma precisão aceitável.

A técnica HIL será utilizada nesta monografia através do uso de um computador de placa única de tamanho reduzido (*Raspberry Pi*). A *Raspberry Pi* representa o *Hardware* do método, e ela será inserida na malha de controle após a etapa de modelagem e controle no ambiente simulado.

3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentadas as técnicas utilizadas para solução do problema. O projeto foi realizado em um ano e sua concepção foi dividida em três frentes, nomeadamente: desenvolvimento da solução para o modelo da planta com controlador simulado, controle da planta simulada com o controlador implementado em dispositivo físico (microcontrolador) e a implementação final em dispositivo real. As etapas pormenorizadas do projeto são as seguintes:

1. Desenvolvimento da solução para o modelo da planta com controlador simulado
 - a) Definição e modelagem da planta de estudo;
 - b) Construção do ambiente de simulação;
 - c) Validação do modelo;
 - d) Implementação e validação da estratégia de controle.
2. Controle da planta simulada com o controlador em dispositivo físico
 - a) Discretização da planta de estudo seguido da obtenção da sua equação de diferenças;
 - b) Discretização do controlador seguido da obtenção da sua equação de diferenças;
 - c) Configuração do ambiente de testes com a planta rodando no computador, e o controlador rodando no microcontrolador (comunicação UART).
3. Implementação em dispositivo real
 - a) Configuração do ambiente com a planta real e o microcontrolador (comunicação UART);
 - b) Implementação da estratégia de controle no microcontrolador;
 - c) Testes de validação da estratégia de controle na planta física.

3.1 Desenvolvimento da solução para o modelo da planta

A modelagem dos manipuladores robóticos visa descrever como os elos e juntas estão configurados fisicamente para tornar possível a configuração de sua orientação e sua posição (PAUL, 1981). Com isso, ao passar uma trajetória de referência que a ferramenta de trabalho deve descrever, as demais juntas se reajustam de modo a garantir que a

ferramenta sempre esteja corretamente posicionada. A estratégia de controle deve, então, estar adequadamente sintonizada para garantir o seguimento acurado da trajetória.

No presente trabalho são realizadas duas modelagens para o manipulador: a modelagem cinemática e a modelagem dinâmica. A modelagem cinemática visa descrever a amplitude de movimento das juntas robóticas, ao passo que a modelagem dinâmica busca considerar as forças e torques que produzem o movimento, descrevendo, explicitamente, a relação entre força e movimento (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

A principal ferramenta utilizada para se obter o modelo cinemático direto de um manipulador robótico é a convenção de *Denavit-Hartenberg* (DH) (PAUL, 1981). A modelagem dinâmica, por sua vez, pode ser realizada por meio das equações de Euler-Lagrange, que correspondem a um método baseado na energia do sistema (LYNCH; PARK, 2017).

3.1.1 Convenção de *Denavit-Hartenberg*

Considera-se que o manipulador a ser modelado é de cadeia aberta, ou seja, um manipulador que o número de graus de liberdade seja igual ao número de articulações ativas. Além disso, ele deve ser constituído por $n + 1$ elos conectados por n juntas, onde o elo 0 é convencionalmente fixado ao solo. Assim sendo, segundo Siciliano et al. (2008), a equação cinemática direta para o manipulador pode ser calculada a partir de:

$$T_n^0 = A_1^0(q_1)A_2^1(q_2) \cdots A_n^{n-1}(q_n) \quad (3.1)$$

A relação (3.1) se refere à transformação de coordenadas descrevendo a posição e a orientação do eixo n em relação à base (eixo 0) (SICILIANO et al., 2008). Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), na convenção DH, cada transformação homogênea A_i representada em (3.1) equivale ao produto de quatro transformações básicas, apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} A_i &= Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A matriz final encontrada em (3.2) é chamada de Matriz de Transformação Homogênea. Os quatro parâmetros da relação (3.2) representam: tamanho do elo (a_i), deslocamento do elo (d_i), giro do elo (α_i), ângulo da junta (θ_i). De acordo com Paul (1981), os parâmetros são obtidos através do procedimento a seguir:

- Rotacionar x_i em torno do eixo z_i um ângulo θ_i ;
- Transladar ao longo do eixo z_i uma distância d_i ;
- Transladar ao longo de x_{i+1} uma distância a_i ;
- Rotacionar z_i em torno de x_{i+1} o ângulo de torção α_i

Assim sendo, a modelagem cinemática é obtida através da multiplicação de diversas matrizes de transformação homogêneas individuais, conforme (3.1). Com isso, para um manipulador com três graus de liberdade, a transformação de coordenadas do elemento terminal em relação a base é dada por $T_3^0 = A_1 A_2 A_3$.

3.1.1.1 Cinemática Diferencial e o Jacobiano

A cinemática diferencial é responsável por fornecer a relação entre as velocidades das juntas e a correspondente velocidade final linear e angular da ferramenta de trabalho (SICILIANO et al., 2008). Essa relação é descrita por uma matriz denominada jacobiana geométrica, que depende da configuração do manipulador. O Jacobiano Analítico, por outro lado, é expresso por meio da diferenciação da função cinemática direta com relação às variáveis das juntas. A obtenção da matriz Jacobiana é fundamental para determinar as equações de movimento do manipulador robótico.

Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), considerando um manipulador com n graus de liberdade, a equação da cinemática direta pode ser escrita na forma:

$$T_n^0(q) = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & o_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A equação (3.3) é a mesma que (3.1), onde $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ é o vetor das variáveis das juntas, $R_n^0(q)$ a matriz de rotação, $o_n^0(q)$ o vetor de translação, 0 a perspectiva e 1 o

fator de escala. As relações da velocidade linear v_n^0 e a velocidade angular ω_n^0 em função das velocidades das juntas é linear (SICILIANO et al., 2008) e pode ser expressa por:

$$v_n^0 = J_v \dot{q} \quad (3.4)$$

$$\omega_n^0 = J_\omega \dot{q} \quad (3.5)$$

onde J_v e J_ω são matrizes $3 \times n$. É possível ainda, reescrever (3.4) e (3.5) da seguinte forma:

$$\zeta = J \dot{q} \quad (3.6)$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} v_n^0 \\ \omega_n^0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

O vetor ζ também pode ser chamado de velocidade do corpo (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005) e é importante notar que ele não é a derivada de uma variável de posição. A matriz J é chamado de **Jacobiano** e trata-se de uma matriz $6 \times n$.

Combinando as partes angular e linear, segundo Siciliano et al. (2008), a metade de cima da matriz do Jacobiano é dada por:

$$J_{v_i} = \begin{cases} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) & \text{para a } i\text{-ésima junta revoluta} \\ z_{i-1} & \text{para a } i\text{-ésima junta prismática} \end{cases} \quad (3.8)$$

A segunda metade, ou a metade baixo da matriz do Jacobiano é dada por:

$$J_{\omega_i} = \begin{cases} z_{i-1} & \text{para a } i\text{-ésima junta revoluta} \\ 0 & \text{para a } i\text{-ésima junta prismática} \end{cases} \quad (3.9)$$

Juntando ambas as metades da matriz do Jacobiano obtém-se para a junta revoluta a equação (3.10) e para a junta prismática (3.11):

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Assim sendo, as únicas ferramentas necessárias para calcular o Jacobiano são os vetores unitários z_i e as coordenadas das origens o_1, \dots, o_n . As coordenadas para z_i são dadas pelos três primeiros elementos da terceira coluna de T_i^0 , enquanto as coordenadas de

o_n são dadas pelos três primeiros elementos da quarta coluna de T_i^0 . Dessa forma, apenas a terceira e a quarta colunas da matriz de homogeneidade T são necessárias para obter o Jacobiano. (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005)

3.1.2 Equações de Euler-Lagrange

Com o conjunto de coordenadas generalizadas independentes q_j , $j = 1, \dots, n$, onde n representa os graus de liberdade do manipulador, o Lagrangiano do sistema é definido pela relação (3.12) (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005), onde K representa a energia cinética e P a energia potencial do sistema:

$$L = K - P \quad (3.12)$$

Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), em geral, as equações de *Euler-Lagrange* aplicadas a um sistema de n coordenadas podem ser representadas na forma da Equação (3.13), onde a força generalizada τ_i representa as forças externas e torques não deriváveis de uma função potencial:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (3.13)$$

Conforme apresentado, as equações de *Euler-Lagrange* podem ser usadas para derivar as equações dinâmicas de maneira direta. É possível computar esses termos para um manipulador robótico de n elos por meio das fórmulas da energia cinética e da energia potencial usando as variáveis de articulação obtidas a partir da modelagem de *Denavit-Hartenberg* como coordenadas generalizadas (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

3.1.2.1 Energia cinética para um manipulador de n elos

Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005) a energia cinética é dada pela soma de dois termos: a energia de translação, obtida concentrando toda a massa do objeto no centro de massa, e a energia cinética rotacional em torno do centro de massa. Assim, a energia cinética do manipulador é dada por:

$$K = \frac{1}{2} m v^T v + \frac{1}{2} \omega^T \Gamma \omega \quad (3.14)$$

onde m é a massa do objeto, v e ω são os vetores de velocidade linear e angular, respectivamente, e Γ é uma matriz simétrica 3×3 chamada Tensor de Inércia. O Tensor de Inércia é relacionado ao quadro de referência inercial do manipulador. Dessa forma, é possível

relacionar o tensor de inércia com a matriz de rotação através de uma transformação de similaridade:

$$\Gamma = RIR^T \quad (3.15)$$

onde R é a matriz de rotação $R_n^0(q)$ obtida em (3.4), e I é uma matriz que não depende do movimento do objeto. Cada elemento dessa matriz é calculado através de integrais sobre as regiões do espaço ocupados por todas as partes do corpo rígido:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \iiint (y^2 + z^2) \rho(x, y, z) dx dy dz \\ I_{yy} &= \iiint (x^2 + z^2) \rho(x, y, z) dx dy dz \\ I_{zz} &= \iiint (x^2 + y^2) \rho(x, y, z) dx dy dz \\ I_{xy} &= I_{yx} = - \iiint xy \rho(x, y, z) dx dy dz \\ I_{xz} &= I_{zx} = - \iiint xz \rho(x, y, z) dx dy dz \\ I_{yz} &= I_{zy} = - \iiint yz \rho(x, y, z) dx dy dz \end{aligned} \quad (3.17)$$

Através do Tensor de Inércia, do jacobiano, da matriz de rotação e da massa de cada parte do braço obtém-se a energia cinética do manipulador:

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (3.18)$$

sendo:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{vi}(q)^T J_{vi}(q) + J_{\omega i}(q)^T R_i(q) I_i(q) R_i(q)^T J_{\omega i}(q)] \quad (3.19)$$

3.1.2.2 Energia potencial para um manipulador de n elos

A energia potencial do manipulador de n elos é dada pela soma da energia potencial individual de cada parte envolvida. A única fonte de energia potencial do manipulador é a gravidade, assumindo que a massa total de cada elemento do manipulador está concentrada no seu centro de massa.

Segundo Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005), a energia potencial é uma função apenas das coordenadas generalizadas e não de suas derivadas, assim, a energia potencial

depende da configuração do robô e independe da velocidade:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n g^T r_{ci} m_i \quad (3.20)$$

onde g é o vetor que dá a direção da gravidade no referencial inercial, e r_{ci} fornece as coordenadas do centro de massa do elo i . Sendo assim, a matriz da energia potencial é dada por:

$$g(q) = \phi_k = \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad (3.21)$$

3.1.2.3 Equações de movimento

Aplicando o que foi exposto anteriormente, as equações de *Euler-Lagrange* (3.13) podem ser expressas segundo:

$$\sum_i d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k = \tau_k \quad , \quad k = 1, \dots, n \quad (3.22)$$

ou na forma matricial:

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad (3.23)$$

onde $D(q)$ e $g(q)$ representam as matrizes da energia cinética e potencial, respectivamente, e $C(q, \dot{q})$ representa uma matriz construída com os chamados Símbolos de Christoffel, definidos matematicamente por Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2005) através da equação:

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (3.24)$$

Como o manipulador RRR possui três juntas revolutas, e cada junta revoluta é descrita por uma matriz 3×3 , serão necessários 27 Símbolos de Christoffel diferentes.

3.2 Ensaio em malha aberta para a obtenção do modelo da planta

O modelo matemático de um sistema é definido como um conjunto de equações que representa a sua dinâmica (OGATA, 2010). Esses modelos são sempre idealizações do comportamento real e são válidos para excitações dentro de certos limites de amplitude e frequência (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

Uma das formas de se obter o modelo de um determinado sistema $G(s)$, dentro de certos limites de amplitude e frequência, é através dos seus dados de entrada $U(s)$ e saída $Y(s)$, vide Figura 4. Ao aplicar na entrada uma referência conveniente (degrau, impulso, senoide), ignorando os fenômenos internos, obtém-se uma determinada saída que

ao ser avaliada ao longo do tempo, ficam aparentes os parâmetros das equações diferenciais procuradas (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

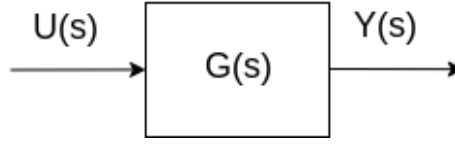


Figura 4 – Diagrama do ensaio em malha aberta

Fonte: Do autor

A resposta temporal de um sistema de controle é composto da resposta transitória, aquela que compreende o tempo entre o estado inicial e o final, e a resposta estacionária que corresponde ao comportamento do sinal de saída quando t tende ao infinito (OGATA, 2010). Dependendo do comportamento das respostas do sistema, ele pode ser classificado como de primeira ordem (3.25), de segunda ordem (3.26) ou como sistema de ordem superior.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.25)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.26)$$

onde:

- τ : constante de tempo do sistema ($\tau > 0$);
- ω_n : frequência natural não amortecida ($\omega_n > 0$);
- ξ : coeficiente de amortecimento.

A constante de tempo do sistema de primeira ordem é definida como o instante em que a resposta do sistema atingiu 63,2% de sua variação final (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011). Por outro lado, para os sistemas de segunda ordem, o que define o ξ é o sobressinal máximo do sistema, e o ω_n pode ser definido pelas constantes de tempo do sistema de segunda ordem, como por exemplo o tempo de acomodação. O tempo de acomodação para uma faixa de $\pm 2\%$ em torno do valor final é dado por (3.27):

$$t_s \cong \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (3.27)$$

3.3 Projeto de sistemas de controle pelo método do lugar das raízes

O lugar das raízes é um método simples que possibilita a representação gráfica das raízes da equação característica para todos os valores do ganho, ou qualquer outro parâmetro da função de transferência de malha aberta (OGATA, 2010). O projeto de controle pelo método do lugar das raízes é realizado através da adição de zeros e polos à função de transferência de malha aberta do sistema, forçando o lugar das raízes a passar pelos polos de malha fechada desejados.

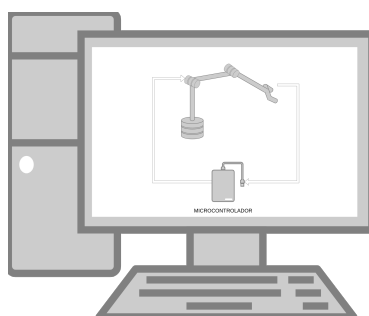
No presente projeto, foram levantados três modelos para planta, um para cada uma das juntas (base, ombro, cotovelo). Para cada uma delas foi projetado um controlador independente (conhecido na literatura como controle de juntas independentes). Os projetos foram realizados através do método do lugar das raízes, com o auxílio da ferramenta *sisotool* do *Matlab*.

3.4 Configuração do ambiente de simulação

A partir dos modelos cinemáticos e dinâmicos obtidos, um ambiente de simulação é concebido na plataforma *Matlab* (Figura 5a). Por meio desse ambiente, diferentes técnicas de controle podem ser sintetizadas e validadas para o manipulador estudado. Posteriormente, é feita a implementação da estratégia de controle sintetizada em dispositivo físico (microcontrolador), sendo que a validação é realizada no ambiente de simulação desenvolvido por meio da técnica HIL, vide Figura 5b. Finalmente, a última etapa corresponde à implementação das estratégias de controle no manipulador robótico estudado (planta física). Como ilustrado na Figura 5c, nessa etapa o microcontrolador é conectado ao manipulador de forma a controlá-lo, fazendo-o seguir uma trajetória pré-especificada. Assim, verifica-se se, de fato, a resposta do sistema físico em malha fechada corresponde à resposta obtida por meio de simulação utilizando a técnica HIL.

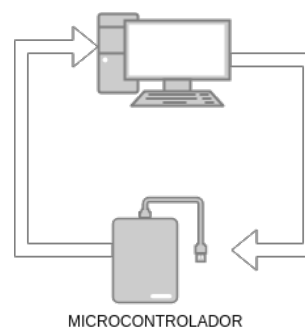
3.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou de forma sucinta a metodologia de projeto seguida para alcançar os objetivos propostos neste trabalho. No próximo capítulo são realizadas as modelagens cinemática e dinâmica do manipulador, a partir das quais o ambiente de simulação foi construído.



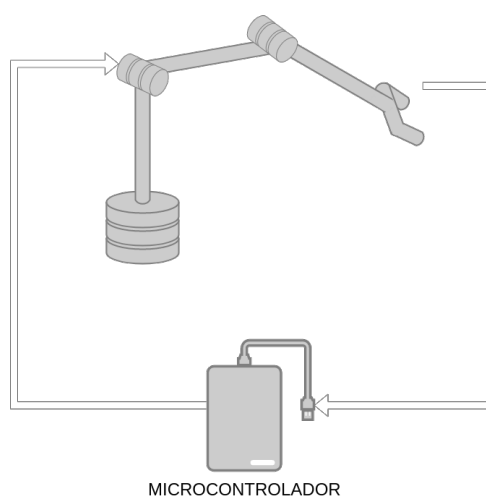
(a) Planta e controlador simulados

Fonte: Do autor



(b) Solução para o modelo simulado da planta

Fonte: Do autor



(c) Solução para a planta física

Fonte: Do autor

Figura 5 – Diagramas das etapas da técnica *Hardware-in-the-loop*

4 Resultados

Neste capítulo, os resultados para o projeto descritos no capítulo anterior serão apresentados. A obtenção do modelo da planta foi dada de duas formas diferentes: por meio da convenção de *Denavit-Hartenberg* e equações de *Euler-Lagrange* e por meio do ensaio em malha aberta. Para o primeiro método, foram feitas algumas considerações, dadas a seguir:

1. O elo do cotovelo e o elo do ombro são barras de comprimento L e massa m , e possuem o eixo de rotação no fim da barra;
2. O elo da base é um cilindro sólido de raio r , altura h e massa m ;
3. A distribuição de massa de cada elo com a sua junta respectiva é simétrica em relação à estrutura do corpo, ou seja, a massa está uniformemente distribuída ao longo do corpo.

O código em MATLAB referente ao modelo obtido por meio da convenção de *Denavit-Hartenberg* e equações de *Euler-Lagrange* é apresentado no Anexo A. A Figura 6 mostra o modelo encontrado por meio da matriz de homogeneidade resultante da convenção DH. Nota-se a coerência deste modelo com o manipulador real por respeitar a proporção e distribuição dos elos e juntas.

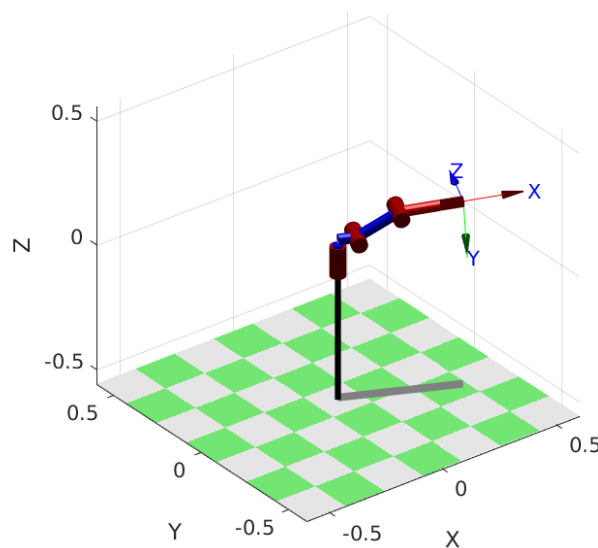


Figura 6 – Gráfico da representação *Denavit-Hartenberg* obtida

Fonte: Do autor

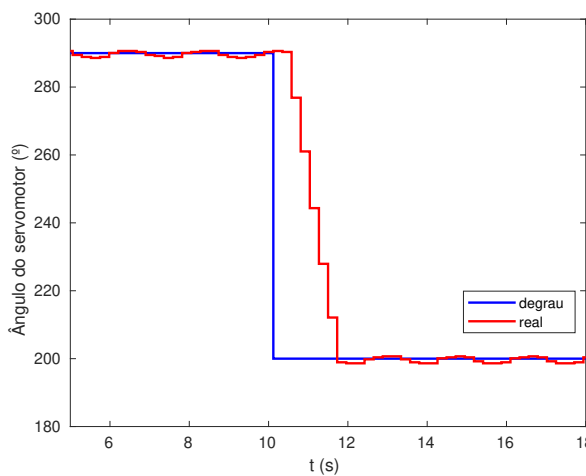
As considerações citadas no início deste capítulo, em conjunto com a complexidade na obtenção dos Símbolos de *Christoffel* tornaram a modelagem EL inviável. A solução mais coerente encontrada foi a execução do ensaio em malha aberta para a obtenção do modelo de cada junta do manipulador, seguido do controle de junta independente

Os modelos da planta usados para projetar os controladores foram obtidos através de ensaios em malha aberta (MA) e seguem na próxima seção. Três modelos foram levantados: um para a base, um para o ombro e outro para o cotovelo, e para cada um deles foi projetado um controlador. Esse processo é conhecido na literatura como controle de juntas independentes.

4.1 Ensaio em malha aberta

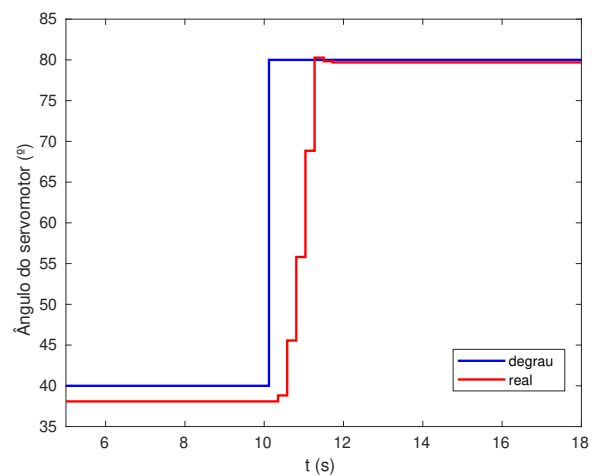
A comunicação com os servomotores foi feita inicialmente com um computador através da porta serial com o protocolo UART. A linguagem usada para a execução do ensaio em malha aberta foi o *Python*, e seu código completo encontra-se disponível em (LELIS, 2019d).

Para cada uma das juntas foi feita uma montagem semelhante a apresentada na Figura 4. Foi aplicada na entrada de cada um dos servomotores uma referência em degrau para o ângulo θ (em graus). Inicialmente, o sistema tinha sido configurado para um tempo de amostragem de 0,01s. De acordo com a resposta obtida, observou-se uma superamostragem dos dados, e, devido a isso, o tempo de amostragem foi reajustado empiricamente para 0,23s. Os ângulos de resposta (em graus) obtidos ao longo do tempo para cada uma das juntas são apresentados na Figura 7.



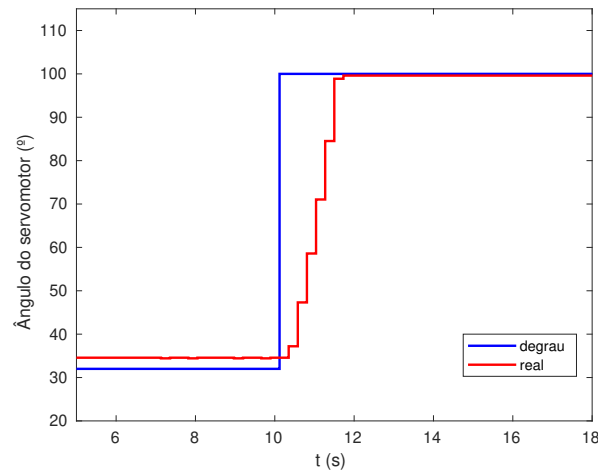
(a) Base

Fonte: Do autor



(b) Ombro

Fonte: Do autor



(c) Cotovelo

Fonte: Do autor

Figura 7 – Gráficos da entrada e resposta para o ensaio em MA de cada uma das juntas

A princípio, observando as respostas em malha aberta das juntas, a dinâmica de cada uma poderia ser aproximada por um modelo de primeira ordem. Entretanto, constatou-se experimentalmente que um modelo de segunda ordem, conforme (3.26), era mais apropriado para descrever a dinâmica de cada junta do sistema. Tal fato se deve, possivelmente, ao controlador interno presente nos servomotores.

Observando as Figuras 7a e 7c, observa-se um comportamento próximo do amortecimento crítico. Quando ocorre esse tipo de comportamento, pode-se escolher $\xi = 1$ na função de transferência. Por outro lado, em 7b, observa-se um pequeno sobressinal, o que resulta em um ξ menor, aproximando-se para este caso: $\xi = 0,8$.

O tempo de acomodação, definido em (3.27), variou para todas as juntas na faixa $0,9s < t_s < 1,3s$. De acordo com testes qualitativos para a validação do modelo, e pelas Figuras 7a, 7b e 7c, foi considerado para a base, ombro e cotovelo respectivamente: $t_s = 1,0952s$, $t_s = 0,9333s$, $t_s = 1,0952s$. Dessa forma, substituindo em (3.27) as constantes encontradas por aproximação, obtém-se para as frequências naturais de oscilação (ω_n) da base, ombro e cotovelo respectivamente: $\omega_n = 3.6522rad/s$, $\omega_n = 5.3571rad/s$, $\omega_n = 3.6522rad/s$. O valor das variáveis encontradas para cada uma das juntas segue na Tabela 1

Tabela 1 – Constantes determinadas para os modelos das juntas

Junta	ξ	t_s (s)	ω_n (rad/s)
Base	1	1,0952	3,6522
Ombro	0,8	0,9333	5,3571
Cotovelo	1	1,0952	3,6522

4.2 Fase 1 da técnica HIL - Planta e controlador simulados

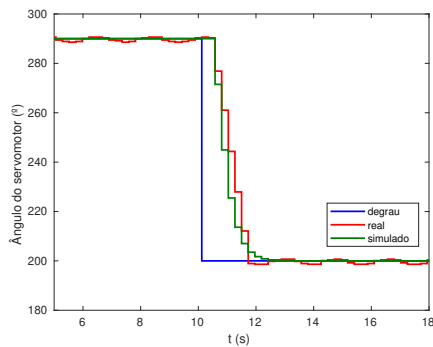
Como foi exposto na seção anterior, as constantes foram encontradas por aproximações de acordo com o que foi observado no ensaio em malha aberta. A partir disso, as funções de transferência para a base, ombro e cotovelo foram obtidas através da Equação (3.26) e seguem respectivamente em (4.1), (4.2) e (4.3):

$$G(s) = \frac{13,3384}{s^2 + 7,3043s + 13,3384} \quad (4.1)$$

$$G(s) = \frac{0,9965 \cdot 28,69898}{s^2 + 8,5714s + 28,69898} \quad (4.2)$$

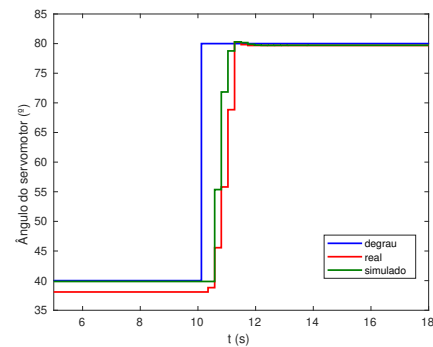
$$G(s) = \frac{13,3384}{s^2 + 7,3043s + 13,3384} \quad (4.3)$$

Os mesmos degraus aplicados na planta real, foram aplicados nas funções de transferência para validação dos modelos. Os resultados obtidos seguem na Figura 8a, na Figura 8b e na Figura 8c.



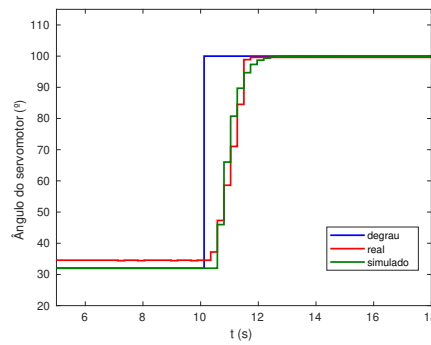
(a) Base

Fonte: Do autor



(b) Ombro

Fonte: Do autor



(c) Cotovelo

Fonte: Do autor

Figura 8 – Gráficos da entrada e resposta do modelo obtido para cada uma das juntas

Note que as curvas simuladas aproximam adequadamente as respostas de cada junta em malha aberta. Assim, conclui-se que os modelos obtidos são satisfatórios para representar as dinâmicas das juntas do manipulador.

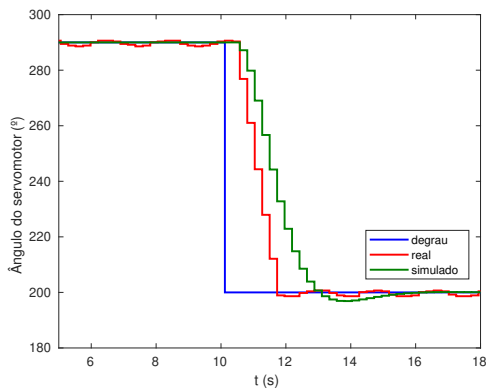
Obtidos os modelos que descrevem as dinâmicas das juntas, a próxima etapa da fase 1 da técnica HIL foi o projeto dos controladores pelo método do lugar das raízes. Considerando que as especificações do projeto de controle seriam atendidas caso houvesse um baixo sobressinal na resposta, e o erro em estado estacionário aproximadamente igual a zero. Dadas as características do modelo da planta, verificou-se experimentalmente que um controlador PI seria suficiente para atender as especificações de projeto. Esse controlador é obtido a partir de (2.1) escolhendo $T_d = 0$. Assim sendo, na análise do lugar das raízes (através da ferramenta *sisotool* do *Matlab*), foi colocado um polo de malha fechada na origem e um zero no eixo real para o controlador de cada uma das juntas. O ganho foi ajustado de tal forma que os polos de malha fechada ficassem o mais próximo possível do eixo real (parte complexa próxima de zero), assim a resposta apresentaria pouca ou nenhuma oscilação ao fechar a malha. A partir dessas considerações de projeto, obtiveram-se os controladores para a base, ombro e cotovelo dados respectivamente por (4.4), (4.5) e (4.6):

$$C(s) = \frac{0,152s + 0,8}{s} \quad (4.4)$$

$$C(s) = \frac{0,413s + 0,9229}{s} \quad (4.5)$$

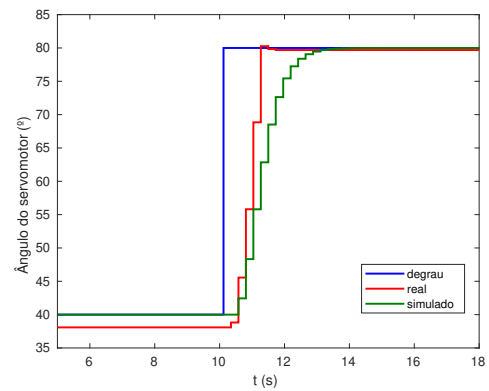
$$C(s) = \frac{0,152s + 0,8}{s} \quad (4.6)$$

O código de simulação completo com as funções de transferência e os controladores projetados encontra-se em (LELIS, 2019a). Ao fechar as malhas, os resultados obtidos para o modelo da planta e para a planta física seguem na Figura 9a, na Figura 9b e na Figura 9c.



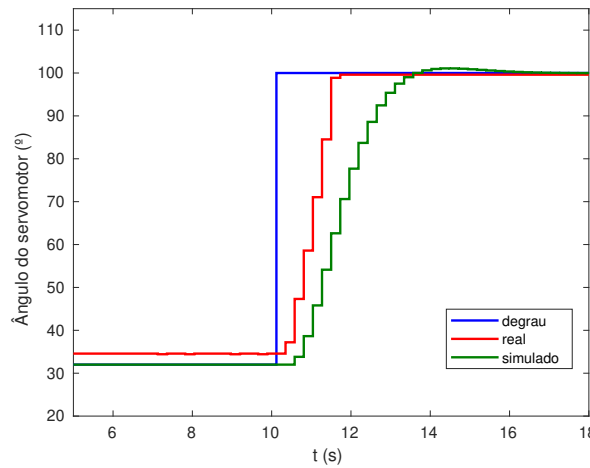
(a) Base

Fonte: Do autor



(b) Ombro

Fonte: Do autor



(c) Cotovelo

Fonte: Do autor

Figura 9 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 1

Nota-se na Figura 9 que as respostas obtidas em malha fechada possuem uma dinâmica mais lenta, isso se deve à não necessidade de uma resposta rápida, mas sim, à necessidade de uma transição mais suave. Outro fator levado em consideração ao fechar a malha foi a obtenção do erro em estado estacionário igual a zero. Em malha aberta, a base apresentava uma variação em torno do estado estacionário infundável, ao fechar a malha essa variação foi corrigida quando o sistema entra em estado estacionário.

4.3 Fase 2 da técnica HIL - Planta simulada, controlador real

Como o sinal da resposta da planta é amostrado periodicamente pela placa de aquisição de dados do computador e pela *Raspberry Pi*, torna-se necessária a discretização do controlador e da planta simulada. A discretização foi feita através do comando *c2d()* do *Matlab* utilizando um segurador de ordem zero e com um tempo de amostragem de 0,23s. O resultado da discretização para as juntas e os respectivos controladores segue. Para a base:

$$G(z) = \frac{0,8273z - 0,6543}{z^2 - 0,9515z + 0,1245} \quad \text{e} \quad C(z) = \frac{0,152z + 0,032}{z - 1} \quad (4.7)$$

para o ombro:

$$G(z) = \frac{0,3876z - 0,198}{z^2 - 0,5515z + 0,1393} \quad \text{e} \quad C(z) = \frac{0,1572z + 0,06513}{z - 1} \quad (4.8)$$

para o cotovelo:

$$G(z) = \frac{0,8273z - 0,6543}{z^2 - 0,9515z + 0,1245} \quad \text{e} \quad C(z) = \frac{0,152z + 0,032}{z - 1} \quad (4.9)$$

O próximo passo foi a obtenção da equação de diferenças para cada uma das plantas e controladores. Para isso, foi feito o seguinte procedimento para o modelo da base e seu respectivo controlador:

$$G(z) = \frac{0,8273z - 0,6543}{z^2 - 0,9515z + 0,1245}$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0,8273z - 0,6543}{z^2 - 0,9515z + 0,1245}$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0,8273/z - 0,6543/z^2}{1 - 0,9515/z + 0,1245/z^2}$$

$$Y(z) - \frac{0,9515}{z} Y(z) + \frac{0,1245}{z^2} Y(z) = \frac{0,8273}{z} U(z) - \frac{0,6543}{z^2} U(z)$$

$$y(k) = 0,8273 u(k-1) - 0,6543 u(k-2) + 0,9515 y(k-1) - 0,1245 y(k-2) \quad (4.10)$$

$$C(z) = \frac{0,152z + 0,032}{z - 1}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0,152z + 0,032}{z - 1}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0,152 + 0,032/z}{1 - 1/z}$$

$$U(z) - \frac{U(z)}{z} = 0,152 E(z) + \frac{0,032}{z} E(z)$$

$$u(k) = u(k-1) + 0,152 e(k) + 0,032 e(k-1) \quad (4.11)$$

O procedimento elucidado é repetido para os modelos e controladores do ombro (4.12) - (4.13) e do cotovelo (4.14) - (4.15), resultando nos seguintes pares de equações a diferenças:

$$y(k) = 0,3876u(k-1) + 0,198u(k-2) + 0,5515y(k-1) - 0,1393y(k-2) \quad (4.12)$$

$$u(k) = u(k-1) + 0,1572e(k) + 0,06513e(k-1) \quad (4.13)$$

$$y(k) = 0,8273u(k-1) - 0,6543u(k-2) + 0,9515y(k-1) - 0,1245y(k-2) \quad (4.14)$$

$$u(k) = u(k-1) + 0,152e(k) + 0,032e(k-1) \quad (4.15)$$

Determinadas as equações a diferenças, foi necessário realizar a montagem conforme a Figura 5b, isto é, configurar a conexão UART entre o computador e a *Raspberry Pi*, e escrever o código em *Python* para a planta simulada e para o controlador que passou a rodar na *Raspberry Pi* (LELIS, 2019b). Com isso, a parte referente à simulação da planta ficou conforme o que segue:

```

1      # BASE - Funcao de transferencia da planta
2      y_k[0] = 0.8273*u_k_delay[0] - 0.6543*u_k_delay_2[0]
3          + 0.9515*y_k_delay[0] - 0.1245*y_k_delay_2[0]
4
5      # SHOULDER - Funcao de transferencia da planta
6      y_k[1] = 0.3876*u_k_delay[1] + 0.198*u_k_delay_2[1]
7          + 0.5515*y_k_delay[1] - 0.1393*y_k_delay_2[1];
8
9      # FOREARM - Funcao de transferencia da planta
10     y_k[2] = 0.8273*u_k_delay[2] - 0.6543*u_k_delay_2[2]
11         + 0.9515*y_k_delay[2] - 0.1245*y_k_delay_2[2];

```

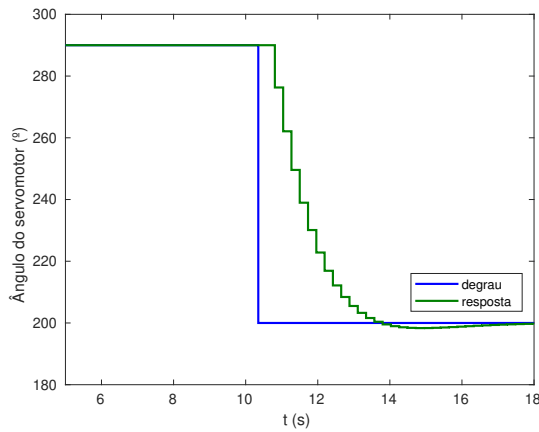
e do lado do controlador na *Raspberry Pi*:

```

1      # BASE - Funcao de transferencia do controlador
2      u_k[0] = u_k_delay[0] + 0.152*e_k[0] + 0.032*e_k_delay[0]
3
4      # SHOULDER - Funcao de transferencia do controlador
5      u_k[1] = u_k_delay[1] + 0.1572*e_k[1] + 0.06513*e_k_delay[1]
6
7      # FOREARM - Funcao de transferencia do controlador
8      u_k[2] = u_k_delay[2] + 0.152*e_k[2] + 0.032*e_k_delay[2]

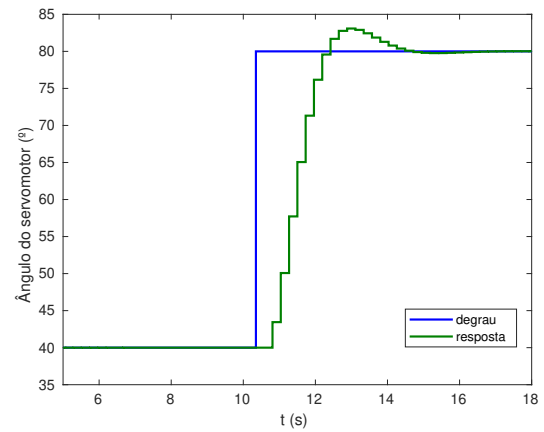
```

Foram aplicadas as mesmas referências em degrau da primeira fase da técnica HIL para cada uma das plantas simuladas. Assim, as saídas obtidas ao longo do tempo para a fase 2 da técnica HIL são apresentadas nas Figuras 10a, 10b e 10c.



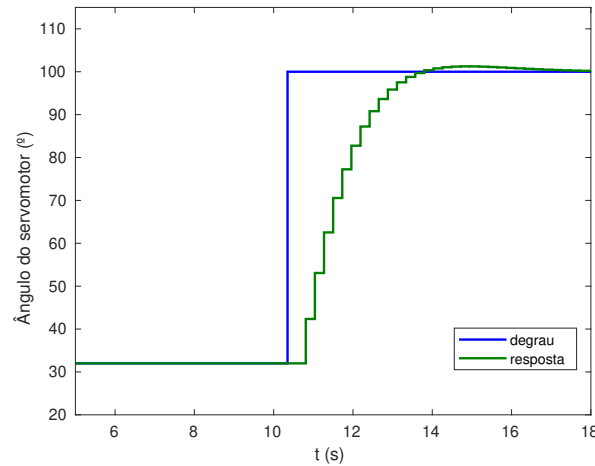
(a) Base

Fonte: Do autor



(b) Ombro

Fonte: Do autor



(c) Cotovelo

Fonte: Do autor

Figura 10 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 2

4.4 Fase 3 da técnica HIL - Planta e controlador reais

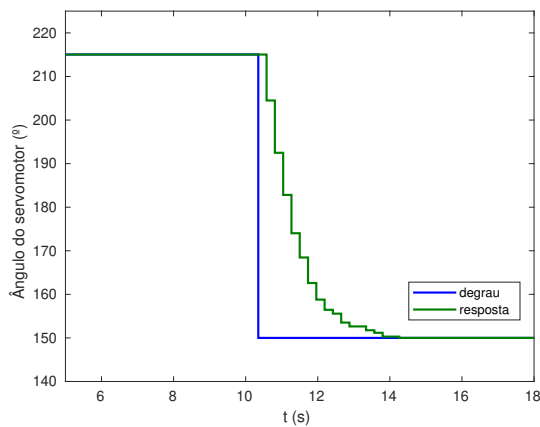
A última etapa da técnica HIL consiste em conectar o controlador implementado e validado na *Raspberry Pi* e conectá-lo à malha de controle da planta do manipulador, conforme a Figura 5c. Além disso, foi necessário configurar um ambiente de comunicação serial UART com os servomotores do manipulador. Para isso, uma biblioteca em *Python* foi utilizada. A parte do código referente à geração do sinal de controle é apresentada abaixo, sendo que o código completo encontra-se disponível em (LELIS, 2019c).

```

1  def get_U_k(self, y_k):
2      # Calcula lei de controle
3      r_k = self.reference
4      e_k = r_k - y_k
5
6      # Controle de posicao
7      u_k = self.u_k_delay + self.Kp*e_k + self.Ki*self.e_k_delay
8
9      return u_k, e_k

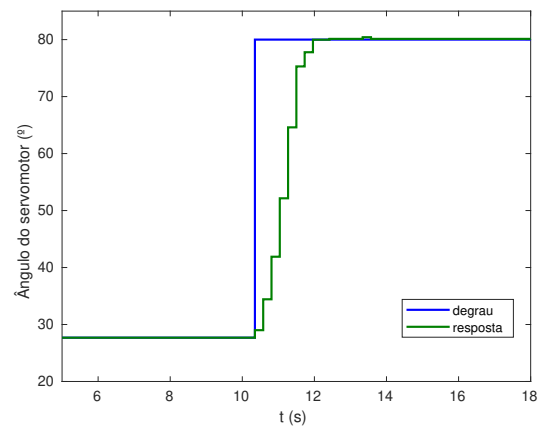
```

Foram aplicadas referências em degrau, mas com leves diferenças para as amplitudes das etapas da técnica HIL anteriores. Desse modo, as saídas obtidas ao longo do tempo para a fase 3 da técnica HIL são mostradas nas Figuras 11a, 11b e 11c.



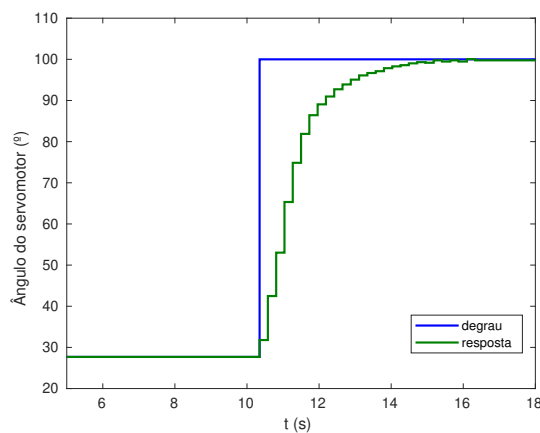
(a) Base

Fonte: Do autor



(b) Ombro

Fonte: Do autor



(c) Cotovelo

Fonte: Do autor

Figura 11 – Gráficos das respostas ao degrau em malha fechada - HIL Fase 3

4.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou os resultados alcançados no projeto, apresentando a memória de cálculo, explicitando como o sistema foi implementado e expondo os resultados por meio dos gráficos. No próximo capítulo são apresentadas as conclusões do projeto, como os resultados estão relacionados, são expostos e também os problemas encontrados. Além disso, são tecidas algumas sugestões para uma futura evolução do projeto.

5 Conclusão

O controle de trajetória de uma manipulador robótico visa configurar o comportamento das juntas de tal forma que a ferramenta de trabalho siga uma trajetória de referência. As maneiras mais usuais de se modelar o comportamento de juntas robóticas são por meio da metodologia de *Denavit-Hartenberg* e das equações de *Euler-Lagrange*, além do modelo de juntas independentes. No presente projeto, a modelagem foi tratada das duas maneiras e o projeto do controlador foi realizado pelo método do lugar das raízes. A sintonia e validação da estratégia de controle foi realizada por meio do uso da técnica HIL.

A técnica HIL, que consiste em inserir um dispositivo físico na malha de controle simulada, foi dividida em três etapas neste projeto. O resultado obtido em cada uma das etapas foi exposto por meio de gráficos com o objetivo de que o padrão se repetisse em todas as etapas. Além disso, a sintonia e validação da estratégia de controle para a planta em questão é fundamental para o êxito da conclusão do projeto.

Analisando o exposto no capítulo anterior, observa-se que as considerações feitas para simplificar a modelagem *Denavit-Hartenberg* e as equações de *Euler-Lagrange* tornaram o desenvolvimento da solução para o modelo da planta fisicamente inviável. A solução mais coerente encontrada foi o ensaio em malha aberta para a obtenção do modelo de cada junta do manipulador, seguido do controle de junta independente.

Os experimentos demonstraram que a modelagem do manipulador teve um resultado coerente com a planta real, sendo que as curvas de resposta ao degrau se sobrepuseram e os parâmetros de tempo de acomodação e máximo sobressinal ficaram bastante similares como desejado. O projeto de controle pelo método do lugar das raízes teve como resultado um controlador que tornou a dinâmica da planta mais lenta. Por outro lado, o controlador PI fez o sistema ficar mais robusto, rejeitando distúrbios ao fechar a malha além de tornar a transição dos estados mais suave (é possível notar a diferença entre as respostas apresentadas na Figura 7 e na Figura 11). Além disso, as respostas ao degrau dos modelos obtidos foram coerentes e apresentaram o mesmo comportamento em todas as etapas do método HIL. Assim, a sintonia e validação da estratégia de controle foi realizada com êxito.

Por fim, o desafio futuro envolve tanto a planta do manipulador quanto a configuração *Hardware in the loop*. Para o manipulador é necessário reduzir ou remover a trepidação observada principalmente na base. Essa trepidação foi reduzida ao validar a estratégia de controle (conforme a Figura 11 mostra), mas ela ainda perdura. A implementação de outras estratégias de controle pode auxiliar na redução da trepidação das juntas e aumento da robustez do sistema. Em relação à técnica HIL, é de grande importância optar por

um *hardware* de tempo real, o que não foi atendido com a *Raspberry Pi*. A solução mais coerente seria modificar o *kernel Linux* da *Raspberry Pi* para tornar o tempo de resposta aos eventos um tempo pré-definido.

Referências

ABOURIDA, S.; DUFOUR, C.; BELANGER, J. Real-time and hardware-in-the-loop simulation of electric drives and power electronics: Process, problems and solutions. *The 2005 International Power Eletronics Conference*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

AGUIRRE, L. *Introdução à Identificação de Sistemas*. [S.l.]: Editora UFMG, 2015. Citado na página 11.

BACIC, M. On hardware-in-the-loop simulation. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, p. 3194–3198, Dec 2005. ISSN 0191-2216. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 17.

BOUSCAYROL, A. Different types of hardware-in-the-loop simulation for electric drives. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 2146 – 2151, 08 2008. Citado na página 13.

BULLOCK, D. et al. Hardware-in-the-loop simulation. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, v. 12, p. 73–89, 02 2004. Citado na página 13.

CASTRUCCI, P.; BITTAR, A.; SALES, R. *Controle Automatico*. Rio de Janeiro, RJ: Editora GEN/LTC, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 11, 16, 17, 25 e 26.

EVANS, M. B.; SCHILLING, L. J. The role of simulation in the development and flight test of the himat vehicle. 05 1984. Citado na página 17.

ISERMANN, R.; SCHAFFNIT, J.; SINSEL, S. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice*, v. 7, p. 643–653, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.

JAIN, S.; KAMALI, C. Hardware in the loop simulation for a mini UAV. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 1, p. 700 – 705, 2016. 4th IFAC Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS 2016. Citado na página 13.

KARPENKO, M.; SEPEHRI, N. Hardware-in-the-loop simulator for research on fault tolerant control of electrohydraulic flight control systems. June 2006. Citado na página 13.

LELIS, L. H. S. *Etapa 1 do método Hardware in the Loop*. [S.l.]: GitHub, 2019. <https://github.com/luizhlelis/rrrManipulatorControl/tree/master/hil_simulation/phase1_simulated/model_2>. Citado na página 33.

LELIS, L. H. S. *Etapa 2 do método Hardware in the Loop*. [S.l.]: GitHub, 2019. <https://github.com/luizhlelis/rrrManipulatorControl/tree/master/hil_simulation/phase2_control_simulation>. Citado na página 36.

LELIS, L. H. S. *Etapa 3 do método Hardware in the Loop*. [S.l.]: GitHub, 2019. <https://github.com/luizhlelis/rrrManipulatorControl/tree/master/hil_simulation/phase3_plant_implament>. Citado na página 37.

- LELIS, L. H. S. *Obtendo o modelo através do ensaio em malha aberta*. [S.l.]: GitHub, 2019. <https://github.com/luizhlelis/rrrManipulatorControl/tree/master/hil_simulation/collectingData>. Citado na página 30.
- LYNCH, K. M.; PARK, F. C. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. 1st. ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2017. Citado na página 20.
- MURPHY, R. R. *Introduction to AI Robotics*. 1st. ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2000. Citado na página 15.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5th. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. (Instrumentation and controls series). Citado 6 vezes nas páginas 11, 16, 17, 25, 26 e 27.
- OPPENHEIN, A.; WILLISKY, A. *Signals & systems*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.: Pearson Education, 1997. Citado na página 11.
- PAUL, R. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control : the Computer Control of Robot Manipulators*. [S.l.]: MIT Press, 1981. (MIT Press series in artificial intelligence). Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 20 e 21.
- PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*. 4th. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2007. Citado na página 16.
- ROTHSTEIN, A.; SIEKMANN, L.; STAUDT, V. Combined-hardware-in-the-loop system and its test-bench verification. *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, p. 581–586, May 2017. Citado na página 13.
- SICILIANO, B. et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. [S.l.]: Springer London, 2008. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). Citado 4 vezes nas páginas 15, 20, 21 e 22.
- SPONG, M.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. [S.l.]: Wiley, 2005. Citado 8 vezes nas páginas 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.

Anexos

ANEXO A – Obtenção do modelo através da convenção de *Denavit-Hartenberg* e equações de *Euler-Lagrange*

```

1  clc;
2  close all;
3
4  % ----- 1) DENAVIT - HATENBERG -----
5  % Rodar o Matlab com um usuario com alto privilegio
6  % 1.1) Carregando a matriz de Denavit-Hatenberg
7
8  dh = [
9      0, 0, 0, 0;
10     0, 0.085, 0.065, -pi/2;
11     0, 0, 0.172, 0;
12     0, 0, 0.235, 0];
13  dh_representation = SerialLink(dh)
14
15  % Carregando angulos iniciais das juntas (radianos)
16  q = [0, 0, 0, 0]
17
18  % Representacao grafica do manipulador
19  dh_representation.plot(q)
20  dh_representation.teach
21
22  % 1.2) Matrizes homogeneas
23
24  % Especificidades do manipulador em estudo
25  syms theta_0 theta_1 theta_2 theta_3;
26
27  alpha_0 = 0;
28  alpha_1 = -pi/2;
29  alpha_2 = 0;
30  alpha_3 = 0;
31
32  a0 = 0;
33  a1 = 0.065;

```

```

34 a2 = 0.172;
35 a3 = 0.235;
36
37 d0 = 0;
38 d1 = 0.085;
39 d2 = 0;
40 d3 = 0;
41
42 syms s0 c0 s1 c1 s2 c2 s3 c3
43 % Usar para exibir resultado em funcao de theta (resultado simbolico)
44 A_0 = [
45         [c0      -s0*1      s0*0      a0*c0];
46         [s0      c0*1      -c0*0      a0*s0];
47         [0       0         1         d0    ];
48         [0       0         0         1     ]];
49
50 A_1 = [
51         [c1      -s1*0      s1*-1      a1*c1];
52         [s1      c1*0      -c1*-1      a1*s1];
53         [0       -1         0         d1    ];
54         [0       0         0         1     ]];
55
56 A_2 = [
57         [c2      -s2*1      s2*0      a2*c2];
58         [s2      c2*1      -c2*0      a2*s2];
59         [0       0         1         d2    ];
60         [0       0         0         1     ]];
61
62 A_3 = [
63         [c3      -s3*1      s3*0      a3*c3];
64         [s3      c3*1      -c3*0      a3*s3];
65         [0       0         1         d3    ];
66         [0       0         0         1     ]];
67
68
69 % Matriz homogenea resultante - z0 = [0 0 1]' e o0 = [0 0 0]'
70 T_0_1 = A_1;
71 T_0_2 = A_1*A_2;
72 T_0_3 = A_1*A_2*A_3;
73 Tresp = vpa(T_0_3,3);
74
75 R_1 = T_0_1(1:3,1:3);

```

```
76 R_2 = T_0_2(1:3,1:3);
77 R_3 = T_0_3(1:3,1:3);
78
79 % ----- 2) EULER - LAGRANGE -----
80
81 % 2.1) Jacobiano
82
83 % z_i = terceira coluna / o_i = quarta coluna
84 z_0 = A_0(1:3,3);
85 o_0 = A_0(1:3,4);
86
87 z_1 = T_0_1(1:3,3);
88 o_1 = T_0_1(1:3,4);
89
90 z_2 = T_0_2(1:3,3);
91 o_2 = T_0_2(1:3,4);
92
93 z_3 = T_0_3(1:3,3);
94 o_3 = T_0_3(1:3,4);
95
96 % Jacobianos para as juntas revolutas (SPONG)
97 J_parc_1 = [
98             cross(z_0,(o_3-o_0));
99             z_0;
100            ];
101 J_parc_2 = [
102             cross(z_1,(o_3-o_1));
103             z_1;
104            ];
105 J_parc_3 = [
106             cross(z_2,(o_3-o_2));
107             z_2;
108            ];
109
110 % Resultados
111 J_1 = [
112         J_parc_1      zeros(6,2);
113        ];
114 J_2 = [
115         J_parc_1      J_parc_2      zeros(6,1);
116        ];
117 J_3 = [
```



```
118         J_parc_1      J_parc_2      J_parc_3;
119     ];
120
121     J_1 = vpa(J_1,3);
122     J_2 = vpa(J_2,3);
123     J_3 = vpa(J_3,3);
124
125     % ----- Matriz D(q) -----
126
127     % As tres primeiras linhas da matriz J correspondem a velocidade
128     % linear e as tres ultimas a velocidade angular
129     J_v1 = J_1(1:3,:);
130     J_w1 = J_1(4:6,:);
131     J_v2 = J_2(1:3,:);
132     J_w2 = J_2(4:6,:);
133     J_v3 = J_3(1:3,:);
134     J_w3 = J_3(4:6,:);
135
136     % Barra de comprimento L e massa m (Eixo de rotacao no fim da barra)
137     %  $I_y = I_z = 1/3*m*L^2$ , onde o eixo x eh o unico paralelo a barra
138
139     % Caso a distribuicao de massa do corpo seja simetrica em relacao a
140     % estrutura do corpo, entao os produtos cruzados de inercia sao
141     % identicos a zero
142     m_motor = .055;
143     m_elo = .010;
144     Raio_1 = .055;
145     g = 9.8;
146     L_1 = .085;
147     L_2 = .172;
148     L_3 = .235;
149
150     m_1 = m_elo;
151     m_2 = m_elo+m_motor*2;
152     m_3 = m_elo+m_motor*4;
153
154     I_1 = [
155         0      0      0;
156         0      0      0;
157         0      0      1/2*m_1*Raio_1^2;
158     ]
159     I_2 = [
```

```

160         0                0                0;
161         0                0                0;
162         0                0                1/3*m_2*L_2^2;
163     ]
164 I_3 = [
165         0                0                0;
166         0                0                0;
167         0                0                1/3*m_3*L_3^2;
168     ]
169
170 D1 = m_1*(J_v1).'*J_v1+J_w1.'*R_1*I_1*R_1.'*J_w1;
171 D2 = m_2*(J_v2).'*J_v2+J_w2.'*R_2*I_2*R_2.'*J_w2;
172 D3 = m_3*(J_v3).'*J_v3+J_w3.'*R_3*I_3*R_3.'*J_w3;
173
174 D = vpa(D1,3) + vpa(D2,3) + vpa(D3,3);
175
176 % ----- Simbolos de Christoffel -----
177
178 % Derivadas: sen(x) = cos(x) / cos(x) = -sen(x)
179
180 syms theta_1 theta_2 theta_3
181 D_11 = (0.065*sin(theta_1) + 0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
182         0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
183         0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(0.015*sin(theta_1)
184         + 0.04*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
185         0.054*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
186         0.054*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
187         (0.065*sin(theta_1) + 0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
188         0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
189         0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(7.8e-3*sin(theta_1)
190         + 0.021*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
191         0.028*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
192         0.028*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
193         (0.065*cos(theta_1) + 0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
194         0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
195         0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(6.5e-4*cos(theta_1)
196         + 1.7e-3*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
197         2.4e-3*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
198         2.4e-3*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
199         (0.065*cos(theta_1) + 0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
200         0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
201         0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(0.015*cos(theta_1)

```

```
202     + 0.04*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
203     0.054*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
204     0.054*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
205     (0.065*cos(theta_1) + 0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
206     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
207     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(7.8e-3*cos(theta_1)
208     + 0.021*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
209     0.028*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
210     0.028*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
211     (6.5e-4*sin(theta_1) + 1.7e-3*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
212     2.4e-3*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
213     2.4e-3*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))*(0.065*sin(theta_1)
214     + 0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
215     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
216     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3));
217
218 D_12 = 1.0*cos(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
219     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
220     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.015*sin(theta_1) +
221     0.04*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
222     0.054*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
223     0.054*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
224     1.0*cos(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
225     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
226     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(7.8e-3*sin(theta_1) +
227     0.021*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
228     0.028*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
229     0.028*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) -
230     1.0*sin(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
231     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
232     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.015*cos(theta_1) +
233     0.04*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
234     0.054*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
235     0.054*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) -
236     1.0*sin(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
237     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
238     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(7.8e-3*cos(theta_1) +
239     0.021*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
240     0.028*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
241     0.028*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3));
242
243 D_13 = 1.0*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
```

```
244     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.015*sin(theta_1) +
245     0.04*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
246     0.054*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
247     0.054*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) -
248     1.0*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
249     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.015*cos(theta_1) +
250     0.04*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
251     0.054*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
252     0.054*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3));
253
254 D_21 = 0.35*cos(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
255     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
256     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.065*sin(theta_1) +
257     0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
258     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
259     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) -
260     0.35*sin(theta_1)*(0.17*sin(theta_2) +
261     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
262     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.065*cos(theta_1) +
263     0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
264     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
265     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3));
266
267 D_22 = (0.23*sin(theta_1)*(0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
268     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
269     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
270     0.23*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
271     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
272     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) *
273     (1.0*sin(theta_1)*(0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
274     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
275     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
276     1.0*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
277     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
278     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) +
279     (0.12*sin(theta_1)*(0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
280     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
281     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
282     0.12*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
283     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
284     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) *
285     (1.0*sin(theta_1)*(0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
```

```
286     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
287     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
288     1.0*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
289     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
290     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) +
291     cos(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
292     4.2e-3*sin(theta_1)^2) + 0.35*cos(theta_1)^2*(0.17*sin(theta_2) +
293     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
294     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))^2 +
295     1.0*sin(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
296     4.2e-3*sin(theta_1)^2) + cos(theta_1)^2*(1.2e-3*cos(theta_1)^2 +
297     1.2e-3*sin(theta_1)^2) + 0.35*sin(theta_1)^2*(0.17*sin(theta_2) +
298     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) + 0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))^2 +
299     1.0*sin(theta_1)^2*(1.2e-3*cos(theta_1)^2 + 1.2e-3*sin(theta_1)^2);
300
301 D_23 = (0.23*sin(theta_1)*(0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
302     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
303     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
304     0.23*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
305     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
306     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) *
307     (1.0*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
308     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
309     1.0*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
310     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) +
311     cos(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 + 4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
312     1.0*sin(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
313     4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
314     0.23*cos(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
315     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.17*sin(theta_2) +
316     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) + 0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2)) +
317     0.23*sin(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
318     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.17*sin(theta_2) +
319     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) + 0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2));
320
321 D_31 = 0.23*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
322     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.065*sin(theta_1) +
323     0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
324     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
325     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) -
326     0.23*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
327     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.065*cos(theta_1) +
```

```
328     0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
329     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
330     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3));
331
332 D_32 =
333     (0.23*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
334     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
335     0.23*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
336     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)))*(1.0*sin(theta_1) *
337     (0.17*cos(theta_2)*sin(theta_1) +
338     0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
339     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
340     1.0*cos(theta_1)*(0.17*cos(theta_1)*cos(theta_2) +
341     0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
342     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) +
343     cos(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
344     4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
345     1.0*sin(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
346     4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
347     0.23*cos(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
348     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.17*sin(theta_2) +
349     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) + 0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2)) +
350     0.23*sin(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
351     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))*(0.17*sin(theta_2) +
352     0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) + 0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2));
353
354 D_33 = 0.23*cos(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
355     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))^2 +
356     0.23*sin(theta_1)^2*(0.24*cos(theta_2)*sin(theta_3) +
357     0.24*cos(theta_3)*sin(theta_2))^2 +
358     cos(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
359     4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
360     1.0*sin(theta_1)^2*(4.2e-3*cos(theta_1)^2 +
361     4.2e-3*sin(theta_1)^2) +
362     (0.23*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
363     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
364     0.23*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
365     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3))) *
366     (1.0*cos(theta_1)*(0.24*cos(theta_1)*cos(theta_2)*cos(theta_3) -
367     0.24*cos(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)) +
368     1.0*sin(theta_1)*(0.24*cos(theta_2)*cos(theta_3)*sin(theta_1) -
369     0.24*sin(theta_1)*sin(theta_2)*sin(theta_3)));
```

```
370
371 del_d11_theta1 = diff(D_11,theta_1);
372 del_d11_theta2 = diff(D_11,theta_2);
373 del_d11_theta3 = diff(D_11,theta_3);
374
375 del_d12_theta1 = diff(D_12,theta_1);
376 del_d12_theta2 = diff(D_12,theta_2);
377 del_d12_theta3 = diff(D_12,theta_3);
378
379 del_d13_theta1 = diff(D_13,theta_1);
380 del_d13_theta2 = diff(D_13,theta_2);
381 del_d13_theta3 = diff(D_13,theta_3);
382
383 del_d21_theta1 = diff(D_21,theta_1);
384 del_d21_theta2 = diff(D_21,theta_2);
385 del_d21_theta3 = diff(D_21,theta_3);
386
387 del_d22_theta1 = diff(D_22,theta_1);
388 del_d22_theta2 = diff(D_22,theta_2);
389 del_d22_theta3 = diff(D_22,theta_3);
390
391 del_d23_theta1 = diff(D_23,theta_1);
392 del_d23_theta2 = diff(D_23,theta_2);
393 del_d23_theta3 = diff(D_23,theta_3);
394
395 del_d31_theta1 = diff(D_31,theta_1);
396 del_d31_theta2 = diff(D_31,theta_2);
397 del_d31_theta3 = diff(D_31,theta_3);
398
399 del_d32_theta1 = diff(D_32,theta_1);
400 del_d32_theta2 = diff(D_32,theta_2);
401 del_d32_theta3 = diff(D_32,theta_3);
402
403 del_d33_theta1 = diff(D_33,theta_1);
404 del_d33_theta2 = diff(D_33,theta_2);
405 del_d33_theta3 = diff(D_33,theta_3);
406
407 c_111 = .5*(del_d11_theta1 + del_d11_theta1 - del_d11_theta1);
408 c_112 = .5*(del_d21_theta1 + del_d21_theta1 - del_d11_theta2);
409 c_113 = .5*(del_d31_theta1 + del_d31_theta1 - del_d11_theta3);
410
411 c_121 = .5*(del_d12_theta1 + del_d11_theta2 - del_d12_theta1);
```

```
412 c_122 = .5*(del_d22_theta1 + del_d21_theta2 - del_d12_theta2);
413 c_123 = .5*(del_d32_theta1 + del_d31_theta2 - del_d12_theta3);
414
415 c_131 = .5*(del_d13_theta1 + del_d11_theta3 - del_d13_theta1);
416 c_132 = .5*(del_d23_theta1 + del_d21_theta3 - del_d13_theta2);
417 c_133 = .5*(del_d33_theta1 + del_d31_theta3 - del_d13_theta3);
418
419 c_211 = .5*(del_d11_theta2 + del_d11_theta1 - del_d11_theta1);
420 c_212 = .5*(del_d21_theta2 + del_d21_theta1 - del_d11_theta2);
421 c_213 = .5*(del_d31_theta2 + del_d31_theta1 - del_d11_theta3);
422
423 c_221 = .5*(del_d12_theta2 + del_d11_theta2 - del_d12_theta1);
424 c_222 = .5*(del_d22_theta2 + del_d21_theta2 - del_d12_theta2);
425 c_223 = .5*(del_d32_theta2 + del_d31_theta2 - del_d12_theta3);
426
427 c_231 = .5*(del_d13_theta2 + del_d11_theta3 - del_d13_theta1);
428 c_232 = .5*(del_d23_theta2 + del_d21_theta3 - del_d13_theta2);
429 c_233 = .5*(del_d33_theta2 + del_d31_theta3 - del_d13_theta3);
430
431 c_311 = .5*(del_d11_theta3 + del_d11_theta1 - del_d11_theta1);
432 c_312 = .5*(del_d21_theta3 + del_d21_theta1 - del_d11_theta2);
433 c_313 = .5*(del_d31_theta3 + del_d31_theta1 - del_d11_theta3);
434
435 c_321 = .5*(del_d12_theta3 + del_d11_theta2 - del_d12_theta1);
436 c_322 = .5*(del_d22_theta3 + del_d21_theta2 - del_d12_theta2);
437 c_323 = .5*(del_d32_theta3 + del_d31_theta2 - del_d12_theta3);
438
439 c_331 = .5*(del_d13_theta3 + del_d11_theta3 - del_d13_theta1);
440 c_332 = .5*(del_d23_theta3 + del_d21_theta3 - del_d13_theta2);
441 c_333 = .5*(del_d33_theta3 + del_d31_theta3 - del_d13_theta3);
442
443 % ----- Energia Potencial -----
444
445 phi_1 = 0;
446 phi_2 = m_2*g*L_2*cos(theta2);
447 phi_3 = m_3*g*L_3*cos(theta2 + theta3);
```