

Luiz Henrique Silva Lelis

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

**Belo Horizonte**

**2019, v1**

Luiz Henrique Silva Lelis

**Implementação de técnicas 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 Engenharia  
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 Antônio Frezzatto Santos

Belo Horizonte

2019, v1

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada . . . . .	4
Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada - <i>Hardware in the Loop</i>	5
Figura 3 – Planta utilizada - manipulador de três juntas revolutas . . . . .	11
Figura 4 – Técnica <i>Hardware-in-the-loop</i> para o modelo simulado e para a planta física . . . . .	17

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação e Justificativa</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos do Projeto</b>	<b>6</b>
<b>1.3</b>	<b>Local de Realização</b>	<b>6</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da Monografia</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Manipuladores Robóticos</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Sistemas de Controle</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Técnica <i>Hardware in the Loop (HIL)</i></b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Desenvolvimento da solução para o modelo da planta</b>	<b>11</b>
3.1.1	Convenção de <i>Denavit-Hartenberg</i>	11
3.1.1.1	Cinemática Diferencial e o Jacobiano	12
3.1.2	Equações de <i>Euler-Lagrange</i>	14
3.1.2.1	Energia cinética para um manipulador de $n$ -elos	15
3.1.2.2	Energia potencial para um manipulador de $n$ -elos	16
3.1.2.3	Equações de movimento	16
<b>3.2</b>	<b>Configuração do ambiente de simulação</b>	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Resumo do Capítulo</b>	<b>17</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>18</b>
	<b>Referências</b>	<b>18</b>

# 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 seja desejado. A implementação do controlador é fundamental para tornar possível processos em diferentes áreas como sistemas eletrônicos de potência (ROTHSTEIN; SIEKMANN; STAUDT, 2017), acionamentos elétricos (BOUSCAYROL, 2008), engenharia de tráfego (BULLOCK et al., 2004) e robótica móvel (JAIN; KAMALI, 2016). Para isso, os sistemas são modelados matematicamente através de equações diferenciais lineares, e o controlador é projetado a partir do modelo matemático.

No controle em malha aberta, a saída não exerce nenhuma ação sobre o sinal de controle. Desta forma, aplica-se um sinal na entrada de uma planta ou de um processo para que a variável controlada atinja um valor desejado, mas este valor obtido na saída não é utilizado para modificar a entrada. O problema deste tipo de controle é que o sistema pode adquirir novas características, por exemplo, ao ocorrerem perturbações. Caso isso ocorra, a saída não terá o valor desejado anteriormente.

Ao fechar a malha, o sinal de saída passa a interferir diretamente na ação de controle. Assim, o sistema ganha o conceito de realimentação e erro, e o controlador tende a reduzir o erro (diferença entre os valores de referência e realimentação) e a manter a saída no valor desejado. “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).”

A simulação *Hardware in the Loop* (HIL) é uma técnica bem estabelecida usada em projeto e avaliação de sistemas de controle (BASIC, 2005). Esta técnica de controle consiste em projetar o controlador para uma determinada planta substituindo o bloco de controle  $C(s)$  na Figura 1 por um microcontrolador físico e validando o desempenho do sistema em malha fechada com esse controlador, como ilustrado na Figura 2.

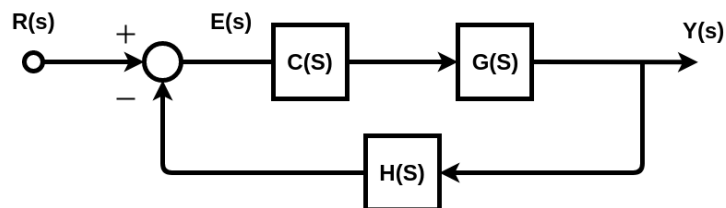


Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada

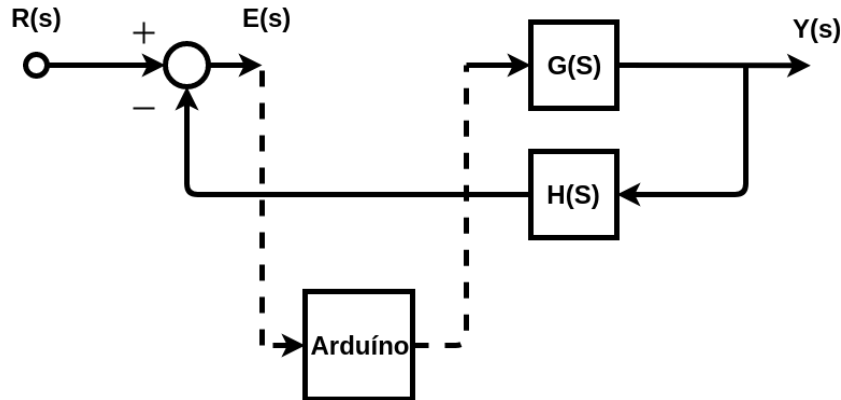


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema em malha fechada - *Hardware in the Loop*

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. Geralmente, uma vez sintonizado o controlador e validado o desempenho em malha fechada da planta realimentada, passa-se a implementação prática do controle sem que haja uma prévia validação do comportamento do controlador quando implementado em dispositivo físico.

O controle da planta possui três etapas distintas de execução. A primeira trata-se do projeto do controlador simulado em conjunto com o modelo da planta; a segunda é a implementação em dispositivo físico do controlador e validação com o modelo da planta; e a terceira trata-se da validação da estratégia de controle na planta física.

## 1.1 Motivação e Justificativa

Nos dias de hoje, as simulações *Hardware in the Loop* (HIL) são utilizadas cada vez mais para desenvolverem novos componentes e atuadores em vários campos diferentes (BOUSCAYROL, 2008). A ação de controle agora não depende apenas da computação numérica, mas também da forma como o modelo interage com um equipamento de controle externo. Além disso, o conceito de sistemas embarcados exige cada vez mais o uso de ferramentas independentes encarregadas de executar uma função específica.

Sabe-se que os seres humanos têm limitações para frequentar determinados ambientes, principalmente os ambientes industriais, onde estão submetidos a alta insalubridade (LACAZ, 2000). Consequentemente, nos últimos anos, tem sido cada vez mais frequente em indústrias, o uso de tecnologias que visam automatizar seus processos de fabricação. Estas soluções visam a melhoria na qualidade do trabalho, e, consequentemente, um aumento de produtividade. Os manipuladores robóticos são exemplos de soluções deste tipo, sejam eles controlados remotamente, ou totalmente independentes da ação humana. A maior parte das aplicações de manipuladores está voltada para a indústria, principalmente as

que utilizam linhas de produção (como montadoras e fabricantes de autopeças) (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

## 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). Além disso, será construída uma plataforma de validação de controladores através do *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 descreve os princípios básicos de um manipulador robótico e a técnica *Hardware in the Loop* (HIL). Ele também abrange todos os conceitos necessários para um melhor entendimento do trabalho. O Capítulo 3 aborda a metodologia de desenvolvimento do trabalho. Nesse capítulo são feitas a modelagem da planta de estudo e validação do modelo, a concepção do ambiente de simulação, as especificações das estratégias de controle no microcontrolador e, por fim, as validações das estratégias por meio de simulações. Os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 4. Primeiramente, a metodologia HIL é validada, para diferentes estratégias de controle, no ambiente de simulação concebido no Capítulo 3 e, posteriormente, os controladores implementados são aplicados à planta física em estudo. 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 através da técnica *Hardware in the Loop* (HIL). Por este 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, pela fonte de energia externa, pelos sensores externos e internos, pela interface de comunicação com o sistema e pelo controle do microcontrolador.

Na composição do manipulador, os elos são conectados pelas 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. As juntas podem ser de revolução ou 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 de 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 - *degrees-of-freedom*) é um parâmetro fundamental para a configuração espacial do manipulador robótico. É ele quem define qual a dimensão do espaço de configuração, ou seja, um manipulador tem  $n$  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 possuem seis ou menos graus de liberdade.



## 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. Entre as especificações mais comuns em do controle de sistemas dinâmicos lineares estão: rejeição do distúrbio, erro em estado estacionário e a resposta transiente.

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 discretos apresentam valores em instantes múltiplos do tempo de amostragem (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011). Por fim, os sinais digitais são os amostrados no tempo com uma amplitude representada em um número limitado de *bits*, ou seja, a amplitude sofre o efeito da quantização. Segundo Castrucci, Bittar e Sales (2011), o mais comum é fazer o projeto do controlador analógico, e depois convertê-lo em digital para a execução computacional. Por outro lado, existem também formas de projetar o controlador em algoritmos digitais diretamente.

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 dele. O seu sucesso está ligado diretamente a sua concepção robusta e sua aplicabilidade geral a maioria dos sistemas. O seu nome é referente a sua função de transferência (Equação 2.1), que é composta pelas ações proporcional, integradora e derivativa (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011):

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

Sendo:

- $u(t)$ : 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.

## 2.3 Técnica *Hardware in the Loop* (HIL)

A idéia básica da simulação de *Hardware-in-the-Loop* (HIL) é a inclusão de uma parte do *hardware* real no loop de simulação durante o desenvolvimento do sistema (BACIC, 2005). Ou seja, 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 simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL) estão relacionados com as simulações de voo (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999). Pouco tempo depois, a NASA desenvolveu simulações de alta fidelidade para o desenvolvimento de tecnologia de aeronaves altamente manobráveis (EVANS; SCHILLING, 1984). Outras aplicações dessas simulações 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.

## 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. São elas: desenvolvimento da solução para o modelo da planta, controle da planta simulada, e a implementação no dispositivo real. As etapas do projeto seguem abaixo:

1. Desenvolvimento da solução para o modelo da planta
  - a) Definição e modelagem da planta de estudo.
  - b) Construção do ambiente de simulação.
  - c) Validação do modelo.
  - d) Implementação de diferentes estratégias de controle.
2. Controle da planta simulada
  - a) Discretização seguido da equação de diferenças da planta de estudo.
  - b) Discretização seguido da equação de diferenças do controlador.
  - c) Configuração do ambiente de testes com a planta rodando no computador, e o controlador rodando no microcontrolador (comunicação *UART*).
3. Implementação no dispositivo real
  - a) Configuração do ambiente com a planta real e o microcontrolador (comunicação *UART*).
  - b) Implementação das estratégias de controle no microcontrolador e validação por meio de HIL.
  - c) Implementação das estratégias de controle na planta física.
  - d) Testes de validação.

É importante ressaltar que a planta utilizada neste trabalho trata-se de um manipulador com três juntas revolutas. O manipulador real, possui outras duas juntas, uma para o punho e outra para a garra, mas estas foram desconsideradas para a modelagem e para o controle. Este 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.

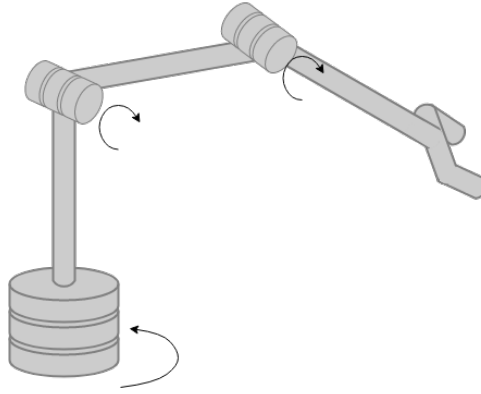


Figura 3 – Planta utilizada - manipulador de três juntas revolutas

### 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 da orientação e posição deles (PAUL, 1981). Com isso, ao passar uma trajetória de referência para a entrada da planta, essa trajetória será seguida pelo sistema caso tenha algum controlador configurado para a planta.

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* (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 da equação 3.1:

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

A equação 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 na equação 3.1 equivale a um produto de quatro transformações básicas, conforme a equação 3.2:

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,\theta_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.2} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

A matriz final encontrada na equação 3.2 é chamada de Matriz de Transformação Homogênea. Os quatro parâmetros da equação 3.2 representam:  $a_i$  = tamanho do elo,  $d_i$  = deslocamento do elo,  $\alpha_i$  = giro do elo,  $\theta_i$  = ângulo da junta. De acordo com Paul (1981), os parâmetros são obtidos através dos itens a seguir:

- Rotacionar  $x_i$  em torno do eixo  $z_i$  um ângulo  $\theta_i$ ;
- 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  $\alpha_i$

Assim sendo, a modelagem cinemática é obtida através da multiplicação de diversas matrizes de transformação homogêneas individuais, conforme a equação 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 (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 conjuntas. 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. A relação da velocidade linear  $v_n^0$  e a velocidade angular  $\omega_n^0$  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  $J_\omega$  são matrizes  $3 \times n$ . É possível ainda, reescrever as equações 3.4 e 3.5 da seguinte forma:

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

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

O vetor  $\xi$  também pode ser chamado de velocidade do corpo (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005), e é importante notar que o 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 a parte angular e linear, segundo Siciliano et al. (2008), a metade de cima da matriz do Jacobino 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 Jacobino 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 a equação 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 quarta coluna 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  $q_j$ , onde  $n$  representa os graus de liberdade do manipulador, o Lagrangiano do sistema é definido pela equação 3.12 (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005), onde  $K$  representa a energia cinética e  $P$  a energia potencial do sistema:

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

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  $\tau_i$  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 mostrado acima, 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 através das fórmulas da energia cinética e energia potencial usando as variáveis da articulação 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, ela pode ser dada pela equação 3.14:

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

onde  $m$  é a massa do objeto,  $v$  e  $\omega$  são os vetores de velocidade linear e angular, respectivamente, e  $\Gamma$  é uma matriz simétrica  $3 \times 3$  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  $I$  é uma matriz que não depende do movimento do objeto. Cada elemento dela 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, e assume-se 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, vide equação 3.20:

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

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 acima, as equações de *Euler-Lagrange* 3.13 agora podem ser expressas conforme a equação 3.22:

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

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 Chistoffel, 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 precisa de uma matriz  $3 \times 3$ , serão necessários 27 Símbolos de Chistoffel diferentes.

## 3.2 Configuração do ambiente de simulação

A partir dos modelos cinemáticos e dinâmicos obtidos, um ambiente de simulação é concebido na plataforma *Simulink/Matlab* (Figura 4a). Por meio desse ambiente, diferentes técnicas de controle são sintetizadas e validadas para o manipulador estudado. Posteriormente, é feita a implementação em dispositivo físico (microcontrolador) dos controladores

sintetizados, sendo que a validação é realizada no ambiente de simulação desenvolvido por meio da técnica *Hardware-in-the-loop* (HIL), vide Figura 4b. Finalmente, a última etapa corresponde à implementação das estratégias de controle no manipulador robótico estudado (planta física). Como ilustrado na Figura 4c, 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.

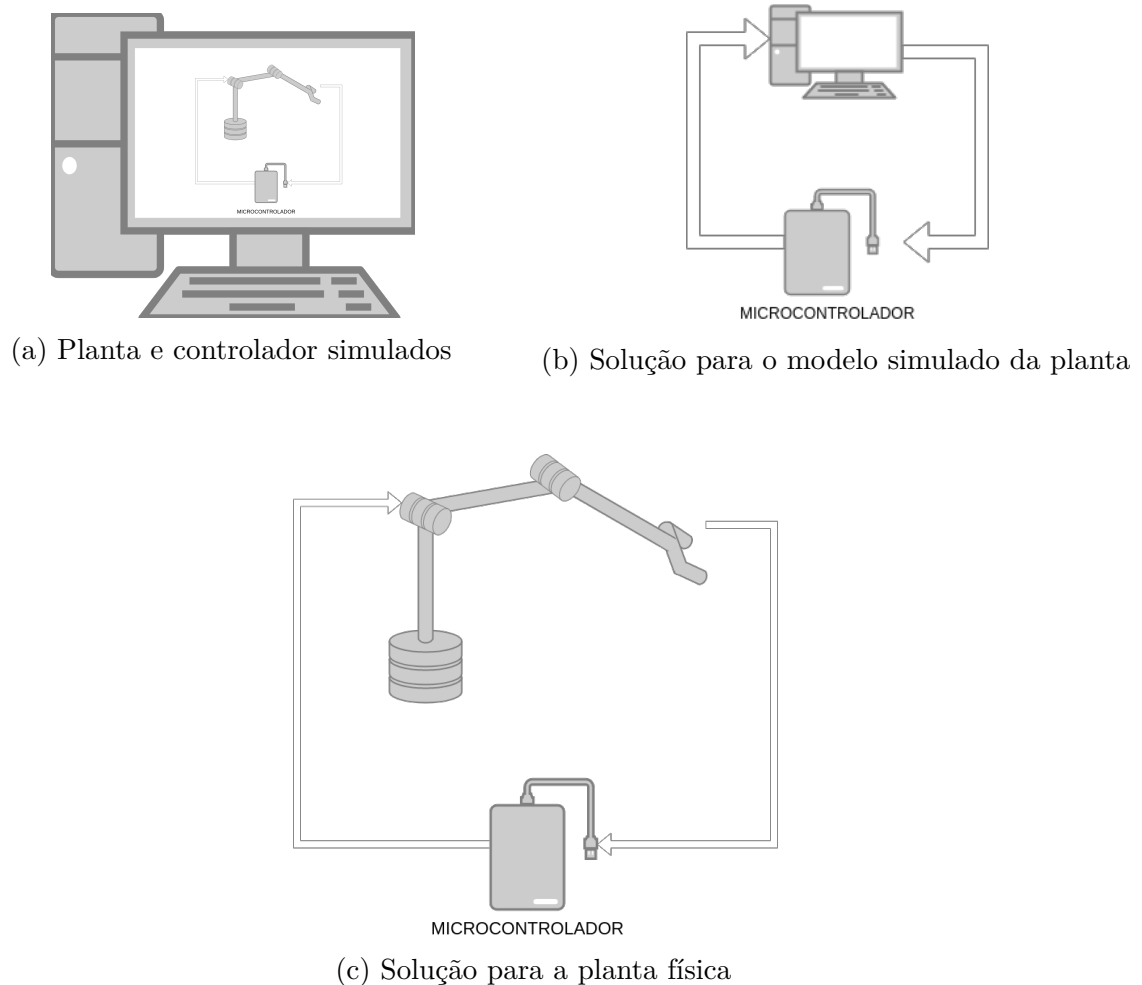


Figura 4 – Técnica *Hardware-in-the-loop* para o modelo simulado e para a planta física

### 3.3 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou de forma sucinta a metodologia de projeto a ser 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 será construído.

# 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 Electronics Conference*, 2005. Citado na página 9.
- BASIC, 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 4 e 8.
- 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 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- 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 4.
- CASTRUCCI, P.; BITTAR, A.; SALES, R. *Controle Automático*. Rio de Janeiro, RJ: Editora GEN/LTC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 8.
- 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 9.
- 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 na página 9.
- JAIN, S.; KAMALI, C. Hardware in the loop simulation for a mini uav. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 1, p. 700 – 705, 2016. ISSN 2405-8963. 4th IFAC Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316301380>>. Citado na página 4.
- LACAZ, F. A. d. C. Qualidade de vida no trabalho e saude/doença. *Cienc. saude coletiva*, sciELO, v. 5, p. 151 – 161, 00 2000. ISSN 1413-8123. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-81232000000100013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232000000100013&nrm=iso)>. Citado na página 5.
- LYNCH, K. M.; PARK, F. C. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. 1st. ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2017. ISBN 1107156300, 9781107156302. Citado na página 11.
- MURPHY, R. R. *Introduction to AI Robotics*. 1st. ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2000. ISBN 0262133830. Citado na página 7.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5th. ed. Prentice Hall, 2010. (Instrumentation and controls series). ISBN 9780136156734. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Wu5GpNAelzkC>>. Citado na página 8.
- OPPENHEIN, A.; WILLSKY, A. *Signals & systems*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.: Pearson Education, 1997. Citado na página 4.

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). ISBN 9780262160827. Citado 3 vezes nas páginas 7, 11 e 12.

PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*. 4th. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2007. ISBN 0130812226, 9780130812223. Citado na página 8.

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 4.

SICILIANO, B. et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer London, 2008. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 9781846286421. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VsTOQOnQjCAC>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.

SPONG, M.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005. ISBN 9780471649908. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=wGapQAAACAAJ>>. Citado 8 vezes nas páginas 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15 e 16.