

ALEX RODRIGO MONTEIRO DE OLIVEIRA

MODELAGEM CINEMÁTICA DO MANIPULADOR ROBÓTICO IRB 8700

Ilha Solteira - SP
2022

ALEX RODRIGO MONTEIRO DE OLIVEIRA

MODELAGEM CINEMÁTICA DO MANIPULADOR ROBÓTICO IRB 8700

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

Ilha Solteira - SP

2022

“Em tudo dai graças; porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.”

1 Tessalonicenses 5:18

FICHA CATALOGRÁFICA

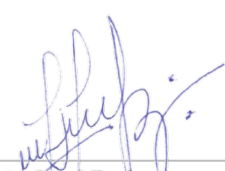
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48m Oliveira, Alex Rodrigo Monteiro de.
Modelagem cinemática do manipulador robótico IRB 8700 / Alex Rodrigo Monteiro de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
31 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica)-
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Márcio Antonio Bazani
Inclui bibliografia

1. Robótica. 2. Manipulador robótico. 3. Análise cinemática.



João José Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA

FILHO" FACULDADE DE ENGENHARIA-CAMPUS DE ILHA

SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA-TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: MODELAGEM CINEMÁTICA DO MANIPULADOR ROBÓTICO
IRB 8700

ALUNO: Alex Rodrigo Monteiro de Oliveira RA: 141052821

ORIENTADOR: Prof.Dr. Márcio Antonio Bazani

Aprovado (X)- Reprovado () pela Comissão Examinadora

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani
Presidente (Orientador)

Me. Josiane Alexandrino dos Santos

Eduardo Preto

Ilha Solteira (SP), 8 de fevereiro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a Deus, familiares, principalmente ao meu irmão André e aos meus pais Osvaldo e Sônia, meus amigos de república e faculdade, aos professores e funcionários da FEIS- UNESP, que tanto somam na vida das pessoas que os encontram. Em especial, dedico aos meus avós maternos e paternos que partiram durante meu período de faculdade e que são exemplos e significado de amor e humanidade a mim.

RESUMO

Neste trabalho, realizaram-se abordagens da robótica desde sua introdução, importância robótica, suas aplicações no mercado, manipuladores robóticos, seus tipos, anatomia e análise cinemática do IRB 8700. Aplicaram-se método de Denavit-Hatemberg para resolução da cinemática direta e para a cinemática indireta, os métodos de desacoplamento cinemático, cinemática inversa de posição e cinemática inversa de rotação. Conclui-se que não só para o manipulador em questão, os métodos utilizados servem de base para análise de manipuladores robóticos em geral, agregando-se conhecimentos e parâmetros necessários para desenvolvimentos de manipuladores robóticos.

Palavras-chave: Robótica. Manipulador. Análise Cinemática.

ABSTRACT

In this work, robotics approaches were carried out since its introduction, robotic importance, its applications in the market, robotic manipulators, their types, anatomy and kinematic analysis of the IRB 8700. The Denavit-Hatenberg method was applied to solve the direct kinematics and for the indirect kinematics, the kinematic decoupling, inverse position kinematics and inverse rotation kinematics methods were applied. It is concluded that not only for the manipulator in question, the methods used serve as a basis for the analysis of robotic manipulators in general, adding knowledge and parameters necessary for the development of robotic manipulators.

Key-words: Robotics. Manipulator. Cinematic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Robôs soldam carros em linha de produção de carros da Ford	14
Figura 2 - Manipuladores Robóticos	15
Figura 3 - Representação da Notação Denavit-Hartenberg	17
Figura 4 - Desacoplamento Cinemático	19
Figura 5 - Cinemática Inversa de Posição	20
Figura 6 - Plano (x_0, y_0)	20
Figura 7 - Plano (x_0, z_0)	21
Figura 8 - Manipulador Robótico IRB 8700	23
Figura 9 - Principais Dimensões	24
Figura 10 - Identificação das juntas	24
Figura 11 - Simplificação do manipulador	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Transformações Básicas de Denavit-Hartenberg	18
Quadro 2 - Dados de movimentação das juntas	25
Quadro 3 – Parâmetros DH	26
Quadro 4 – Valores de entrada	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo	13
1.2. Introdução histórica	13
1.3. Manipuladores robóticos.....	15
1.4. Cinemática Direta	17
1.5. Cinemática Inversa	19
1.5.1 Cinemática Inversa de Posição.....	20
1.5.2. Cinemática Inversa de Orientação.....	22
2. ESTUDO DO CASO.....	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
3.1. Cinemática Direta	26
3.2. Cinemática Inversa	28
4. CONCLUSÃO	30
5. REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivos discorrer sobre a robótica e a modelagem matemática de um manipulador robótico, o IRB 8700 da ABB Robotics, pela cinemática direta e inversa.

1.2. Introdução histórica

Robótica, de acordo com (MCKERROW e ZIMA, 1991), entende-se como uma disciplina que envolve:

- a) O projeto, construção, controle e programação de robots (robôs);
- b) O uso de robots para resolver problemas;
- c) O estudo dos processos de controle, sensores e algoritmos usados em humanos, animais e máquinas, e;
- d) A aplicação desses processos de controle e destes algoritmos para o projeto de robots.

O termo “robot”, em português robô, aparece pela primeira vez em uma peça de teatro do escritor tcheco (CAPEK, 1920). Segundo o mesmo, deriva-se de “robota”, cujo significado é de trabalho forçado ou escravo.

Desde então, o conceito de robot se difundiu, e robô passou a ser uma alternativa para sociedade de maneira a exercer papéis e atividades que até então eram feitas apenas por seres humanos, ou seja, a evolução da robótica permitiu-se sintetizar alguns aspectos da função humana pelo uso de mecanismos, sensores, atuadores e computadores.

Até que por volta de 1950, Asimov, um escritor de ficções científicas, propôs as três leis da robótica e depois adicionou a lei zero:

- Lei zero: um robô não pode causar mal à humanidade ou, por omissão, permitir que a humanidade sofra algum mal;
- 1ª Lei: um robô não pode maltratar um ser humano, ou pela sua passividade deixar que um ser humano seja maltratado;
- 2ª Lei: um robô deve obedecer às ordens dadas por um ser humano, exceto se entrar em conflito com a 1ª lei;
- 3ª Lei: um robô deve proteger a sua própria existência desde que essa proteção não entre em conflito com a 1ª e 2ª lei.

Segundo a RIA (Robotics Industries Association), um robô é um manipulador multifuncional, programável, projetado para mover materiais, componentes, ferramentas

ou dispositivos especiais através de movimentos programáveis para a execução de uma variedade de tarefas.

Desta maneira, os robôs tornaram-se aliados ao desenvolvimento tecnológico, trazendo benefícios a diversas áreas na sociedade como: nas indústrias, desempenhando tarefas de grandes riscos, desgastes físicos, acidentes; na medicina, em procedimentos cirúrgicos; na fisioterapia, ajudando em tratamentos e reabilitação de pacientes; na tecnologia espacial, exploração e estudo de planetas e universo; na indústria automobilística, aprimoração de processos produtivos, testes de campo e laboratório; na automação residencial, uso de robôs em tarefas domésticas.

Sabendo-se que estamos vivendo uma época de desenvolvimento sustentável e de indústria 4.0, o uso de robôs, principalmente na área industrial, nos corresponde de maneira positiva ao momento. Pois somam-se como alternativas viáveis de investimento para uma indústria poder seguir a diretriz traçada mundialmente. Com uma produção mais rápida, padronizada, com maior eficiência e produtividade dos processos, profissionalização dos trabalhadores, economia e segurança. A Figura 1 demonstra a utilização de robôs num processo de produção.

Figura 1 - Robôs soldam carros em linha de produção de carros da Ford



Fonte: CONTEÚDO (2017)

1.3. Manipuladores robóticos

Figura 2 - Manipuladores Robóticos



Fonte: SILVEIRA (2019)

A Figura 2 apresenta alguns exemplos de manipuladores robóticos que na indústria se tornaram imprescindíveis para o desenvolvimento e produção, pois o ser humano tem limitações e dificuldade de adaptação em ambientes insalubres e esses robôs controlados remotamente são responsáveis por realizar estas atividades.

Dentre os principais investimentos das indústrias para área de automação, é justificado também pela alta produtividade, confiabilidade e amplas aplicações como: soldagens, paletização, embalagem de alimentos, manipulação de vidro, montagem automotiva e outras mais.

Um manipulador robótico pode ser definido como um dispositivo mecânico controlado por software, cuja finalidade é específica para diversos processos automatizados. Além disso, manipuladores robóticos podem utilizar sensores para auxiliar na orientação e movimentação de suas partes em diversas ocasiões preestabelecidas (LOPES, 2002).

Existem diversos tipos de robôs industriais e cada um desses tipos pode ser empregado para realizar tarefas específicas com maior clareza e perfeição. Esses tipos de robôs surgem por meio de combinações de juntas e elos para se obter a configuração desejada. (SIMPLÍCIO, LIMA e JUNKES, 2016).

- Robôs de coordenadas cartesianas que possuem três articulações deslizantes (prismáticas), conhecidas como PPP;
- Robôs de coordenadas cilíndricas que são compostos por uma junta rotacional e duas prismáticas, que são RPP;
- Robôs de coordenadas esféricas (RRP) com dois movimentos rotacionais e um prismático;

- Robôs com articulações horizontais (RRP), conhecidos como robôs SCARA, com duas juntas de rotação e uma prismática;
- Robôs com articulações verticais (RRR), com três articulações rotativas. São os mais utilizados na indústria.

Sua anatomia é formada por:

- Base: fixa no chão de fábrica ou em um suporte;
- Elos: formam uma cadeia cinemática;
- Juntas: responsáveis pelo movimento dos elos;
- Efetuador final: formado pelo punho e uma garra ou ferramenta;
- Atuadores: motores elétricos, hidráulicos ou pneumáticos;
- Sensores: Encoders, tacômetros, lasers, câmeras, etc.

Um robô manipulador é composto por uma sequência de elos rígidos conectados por meio de juntas rotativas ou prismáticas. Juntas rotativas tem como movimento a rotação em torno de seu eixo e juntas prismáticas tem como movimento o deslocamento linear ao longo de seu eixo (AL-MASHHADANY, 2010). E as articulações são responsáveis por fornecer os graus de liberdade (GDL).

No mercado de manipuladores, existem diversas opções e para diferentes aplicações. Um dos fatores importantes na escolha é o volume de trabalho que representa o espaço do ambiente ao redor do manipulador que o seu efetuador pode alcançar. A forma e a medida do volume dependem da estrutura do manipulador bem como das limitações de suas juntas. (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

O número de graus de liberdade que um manipulador possui é o número de variáveis de posição independentes que teriam de ser especificadas para se localizarem todas as peças do mecanismo (CRAIG, 2004). No caso dos robôs industriais típicos, o número de juntas é igual ao de graus de liberdade (CRAIG, 2004).

Para robôs industriais de 6 graus de liberdade, suas juntas podem ser divididas em: juntas principais que são as três primeiras, próximas da base, que posicionam o efetuador dentro do volume de trabalho; e as juntas do punho, próximas do elemento terminal, que orienta o efetuador. (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

Dentro de sua importância citada, torna-se necessário o estudo e aprimoramento de manipuladores robóticos. A análise cinemática de um manipulador serial tem como objetivo descrever o movimento de um manipulador em relação a um sistema de coordenadas fixo, desconsiderando as forças e torques necessários (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

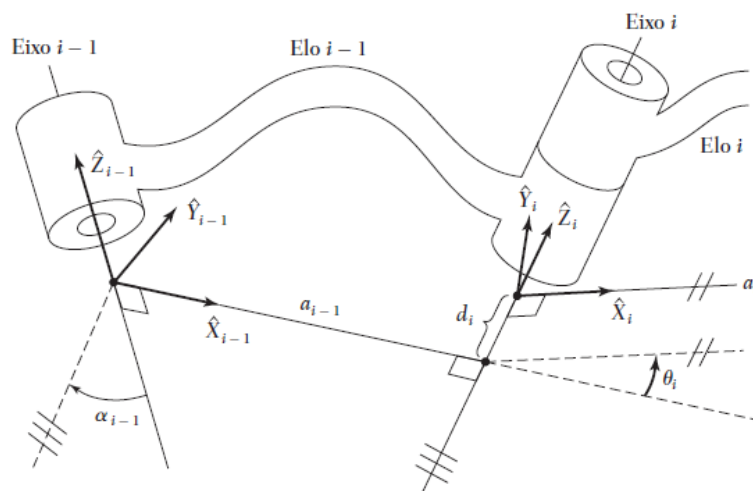
Separam-se a análise cinemática em cinemática direta e cinemática indireta. Dado um conjunto de ângulos de junta, o problema da cinemática direta é computar a posição e a orientação do sistema de referência da ferramenta com relação ao sistema da base. Já a cinemática inversa é dada a posição e a orientação do efetuador, quais os ângulos das juntas para obter a posição e orientação desejada. (CRAIG, 2004)

A análise cinemática assegura-se por métodos matemáticos e geométricos para resolução dos problemas. Partindo-se desde a descrição de posição, descrição de orientação e por meio destas, a transformação homogênea.

1.4. Cinemática Direta

Para esta análise utilizaremos a convenção de Denavit (1956), que padronizou o sistema de referência nos mecanismos. Utilizam-se quatro parâmetros para caracterizar as matrizes de transformação assim como os movimentos gerados pelas juntas do mecanismo, providos da interpretação da Figura 3:

Figura 3 - Representação da Notação Denavit-Hartenberg



Fonte: CRAIG (2004)

Dois parâmetros são descritos pelos elos e os outros dois pelas juntas. São eles:

- $a_i \rightarrow$ Distância entre os eixos de junta Z_i e Z_{i-1} ao longo do eixo X_i , referente ao comprimento do elo;
- $\alpha_i \rightarrow$ Ângulo entre os eixos de junta Z_{i-1} e Z_i em torno de X_i , referente ao ângulo de torção do elo;
- $d_i \rightarrow$ Distância entre os eixos X_{i-1} e X_i ao longo do eixo Z_{i-1} , referente o distanciamento das juntas (offset do elo);
- $\theta_i \rightarrow$ Ângulo entre os eixos X_{i-1} e X_i em torno de Z_{i-1} , referente ao ângulo da junta.

Ambos ângulos citados acima, seus sinais respeitam a regra da mão direita.

A fim de descrever a localização de cada elo em relação aos seus vizinhos, definimos um sistema de referência fixado a cada elo. Os sistemas de referência dos elos são identificados por número de acordo com o elo ao qual estão fixados (CRAIG, 2004).

Duas restrições importantes para os sistemas de referência são:

- X_i deve ser perpendicular a Z_{i-1} ;
- Projeção de X_i deve interceptar Z_{i-1} .

Nota: Os eixos Y_i são definidos pela regra da mão direita.

Definindo um sistema de referência para cada elo, desmembramos o problema cinemático em n subproblemas. A fim de resolvê-los, teremos de desmembrar ainda cada subproblema em quatro outros. Cada uma dessas quatro transformações será uma função de apenas um parâmetro de elo e será simples o suficiente para que possa escrever sua forma por inspeção. Conforme Quadro 1:

Quadro 1 - Transformações Básicas de Denavit-Hartenberg

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$R_{Z,\theta}$	Rotação em torno do eixo Z por um ângulo θ
$T_{Z,d}$	Translação ao longo do eixo Z por uma distância d
$T_{X,a}$	Translação ao longo do eixo X por uma distância a
$R_{X,\alpha}$	Rotação em torno do eixo X por um ângulo α

Fonte: (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

Com base na Figura 3 e Quadro 1, seguem os cálculos correspondentes a uma transformação homogênea (H) genérica:

$$H_{i-1}^i = R_{Z,\theta} \cdot T_{Z,d} \cdot T_{X,a} \cdot R_{X,\alpha} \quad (1)$$

$$R_{Z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{Z,d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{X,a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{X,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\text{sen}\alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Multiplicando-se as equações, obtém-se a matriz genérica de qualquer transformação homogênea.

$$H_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \cdot \cos\alpha_i & \text{sen}\theta_i \cdot \text{sen}\alpha_i & a \cdot \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \cdot \text{sen}\alpha_i & a \cdot \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Portanto, para obter a transformação total de um manipulador de n graus, deve-se multiplicar todas as matrizes transformações, conforme a Equação (7) abaixo:

$$H_0^n = H_0^1 \cdot H_1^2 \dots H_{n-1}^n \quad (7)$$

A transformação total fornece as equações da cinemática direta, com a sua orientação através de uma matriz 3×3 $R(q)$ e posição final por meio do vetor 1×3 $P(q)$, presente na última coluna da matriz.

$$H_0^n = \begin{bmatrix} R(q) & P(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P(q) = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R(q) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

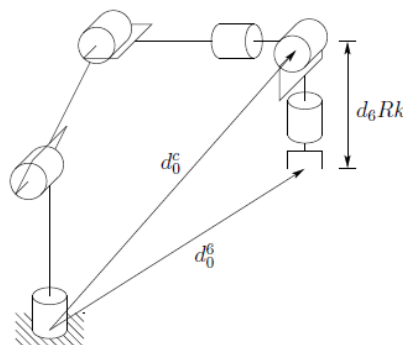
Onde p corresponde a posição, q às variáveis articulares e r_{11} até r_{33} são vetores ortonormais que correspondem a orientação.

1.5. Cinemática Inversa

Para resolução da cinemática inversa, utilizou-se o método de desacoplamento cinemático. Para manipuladores que possuem seis juntas, com as três últimas interceptando em um ponto, é possível desacoplar o problema de cinemática inversa em dois problemas mais simples, conhecidos respectivamente, como cinemática inversa de posição e cinemática inversa de orientação (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989).

Para um manipulador do seis articulações com um punho esférico, deve-se encontrar a posição de intersecção dos eixos do punho, P_c , para então encontrar a orientação do pulso, separando o pulso esférico das demais juntas. Conforme mostrado na Figura 4:

Figura 4 - Desacoplamento Cinemático



Fonte: (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

A determinação de P_c se dá a partir da posição do efetuador, P , realiza-se a translação do elo d_6 na orientação do efetuador em relação ao eixo z , dado pela Equação (11).

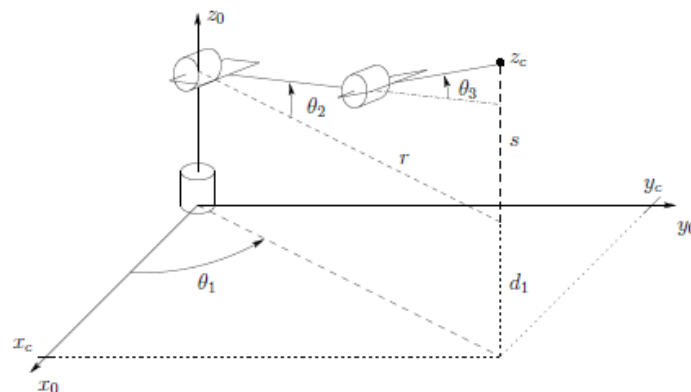
$$P_c = P - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Conhecida a posição do punho, $P_c (x_c, y_c, z_c)$, é possível determinar as variáveis das juntas até ele.

1.5.1 Cinemática Inversa de Posição

A resolução da cinemática inversa de posição para manipuladores que contém apenas juntas rotacionais, é comumente utilizado o método geométrico, que se baseia em relações trigonométricas e geométricas.

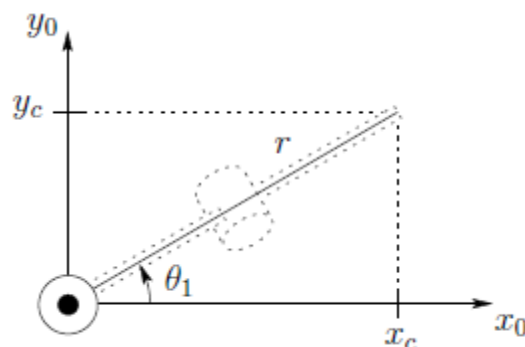
Figura 5 - Cinemática Inversa de Posição



Fonte: (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

Dada a Figura 5, pode-se analisar o manipulador por diversos planos. E para determinar o valor da primeira junta (θ_1), analisa-se o plano (x_0, y_0) , ilustrado a seguir na Figura 6.

Figura 6- Plano (x_0, y_0)



Fonte: (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

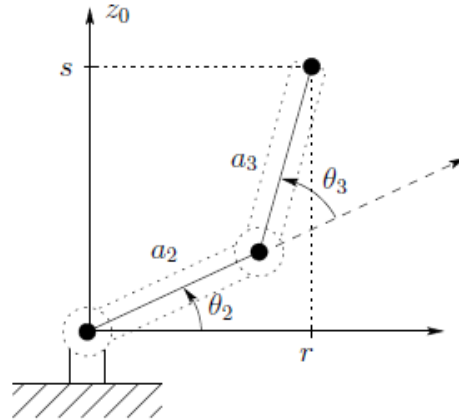
Assim, calcula-se θ_1 :

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_c, x_c) \quad (12)$$

Vale lembrar a importância utilização de atan2 , pois utilizam-se dois parâmetros para evitar ambiguidade, pois a função conhece o quadrante dado em x_c e y_c .

Para os ângulos θ_2 e θ_3 , analisa-se o manipulador a partir do plano (x_0, z_0) , conforme Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Plano (x_0, z_0)



Fonte: (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 1989)

Aplicando a lei dos cossenos para obter θ_3 , tem-se:

$$\cos\theta_3 = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} = \frac{x_c^2 + y_c^2 - d^2 + (z_c - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} = D \quad (13)$$

Sendo $r^2 = x_c^2 + y_c^2 - d^2$ e $s = z_c - d_1$.

Desta forma, θ_3 é dado por:

$$\theta_3 = \text{atan2}(D, \pm\sqrt{1 - D^2}) \quad (14)$$

As duas soluções obtidas da equação acima correspondem às posições do cotovelo ser para cima ou para baixo.

De maneira similar, θ_2 é calculada conforme segue:

$$\theta_2 = \text{atan2}(r, s) - \text{atan2}(a_2 + a_3 c_3, a_3 c_3) \quad (15)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, z_c - d_1\right) - \text{atan2}(a_2 + a_3 c_3, a_3 c_3) \quad (16)$$

1.5.2. Cinemática Inversa de Orientação

Com os resultados obtidos pela cinemática inversa de posição, calcula-se a cinemática inversa de orientação para determinação da matriz de orientação do punho (R_3^6), obtida pela transformação homogênea das juntas 4, 5 e 6.

$$R_3^6 = (R_0^3)^{-1}R \quad (17)$$

Utiliza-se a matriz de rotação R , proveniente da cinemática direta, e R_0^3 matriz transformação das três primeiras juntas, utilizando os ângulos calculados pela cinemática inversa de posição do pulso.

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_6s_4 - c_4c_5s_6 & c_4s_5 \\ c_4c_6 + c_5c_6c_4 & c_4c_6 - c_5s_4s_6 & s_4s_5 \\ -c_6s_5 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$c_4s_5 = c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} + s_{23}r_{33} \quad (19)$$

$$s_4s_5 = -c_1s_{23}r_{13} - s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33} \quad (20)$$

$$c_5 = s_1r_{13} - c_1r_{23} \quad (21)$$

Caso as expressões (19), (20) e (21) acima não forem zero, de acordo com a literatura, encontram-se os ângulos da seguinte forma:

$$\theta_4 = \text{atan2}(c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} + s_{23}r_{33}, -c_1s_{23}r_{13} - s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33}) \quad (22)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(s_1r_{13} - c_1r_{23}, \pm\sqrt{1 - (s_1r_{13} - c_1r_{23})^2}) \quad (23)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-s_1r_{11} + c_1r_{21}, -s_1r_{12} - c_1r_{22}) \quad (24)$$

OBS: $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$

2. ESTUDO DO CASO

O manipulador em questão é o IRB 8700, Figura 8, da empresa ABB é um robô industrial de alta performance presente na 8ª geração para cargas úteis pesadas. Com foco na alta capacidade de produção, design compacto, serviço simples e baixo custo de manutenção. Oferece velocidades 25% mais rápidas que qualquer outro robô da mesma classe de tamanho. Um robô que consegue manusear objetos pesados e largos.

Figura 8 - Manipulador Robótico IRB 8700

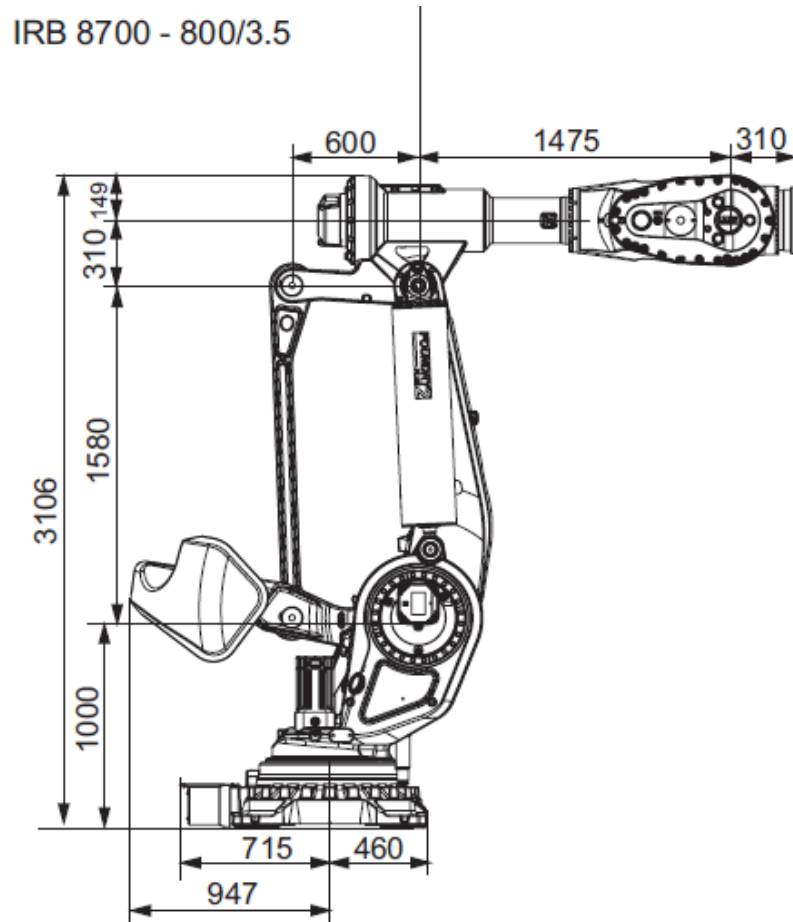


Fonte: (ABB, 2021)

O sistema de quatro barras que ele possui tem atuação relevante no balanceamento do robô, mas a fim de análise cinemática que faremos, apenas limita os ângulos das juntas, pois o manipulador possui um motor e engrenagem para cada articulação.

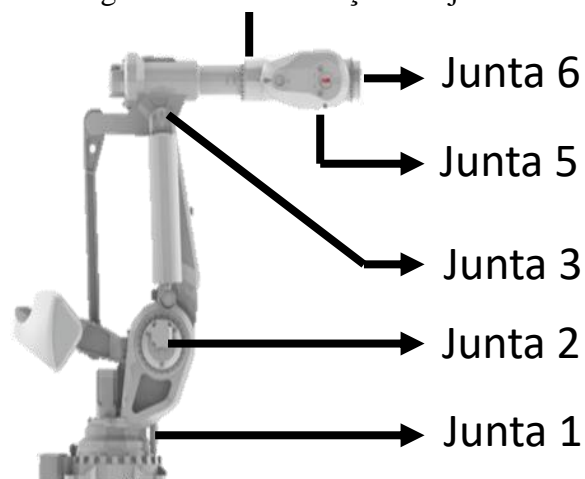
Segue, por meio da Figura 9, os dados das principais dimensões para o manipulador IRB 8700 – 800/3,5 e com a Figura 10, a identificação das juntas:

Figura 9 - Principais Dimensões



Fonte: (ABB, 2021)

Figura 10 - Identificação das juntas



Fonte: Adaptada de (ABB, 2021)

2: Faixa de trabalho de cada junta de acordo com manual da ABB segue no Quadro

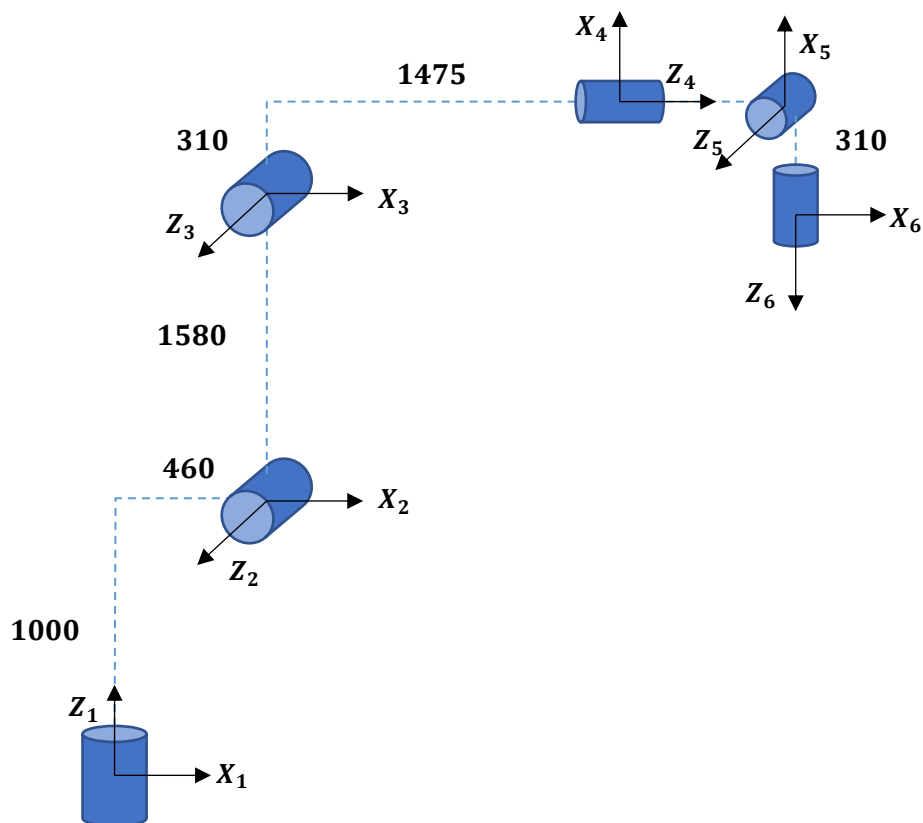
Quadro 2 - Dados de movimentação das juntas

<i>Juntas</i>	<i>Faixa de trabalho (ângulos)</i>
<i>Junta 1</i>	$\pm 170^\circ$
<i>Junta 2</i>	$-65^\circ / +90^\circ$
<i>Junta 3</i>	$-30^\circ / +132^\circ$
<i>Junta 4</i>	$\pm 300^\circ$
<i>Junta 5</i>	$\pm 130^\circ$
<i>Junta 6</i>	$\pm 360^\circ$

Fonte: (ABB, 2021)

De acordo com as dimensões e anatomia do manipulador, para simplificar o entendimento, analisou-se conforme segue Figura 11:

Figura 11 - Simplificação do manipulador IRB 8700



Fonte: Autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cinemática Direta

Com a Figura 11, pode-se iniciar as análises. Começando pela cinemática direta, tem-se os seguintes parâmetros de DH no Quadro 3:

Quadro 3 – Parâmetros DH

Junta	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	460	$\pi/2$	1000	θ_1
2	0	0	1580	θ_2
3	1475	$\pi/2$	310	θ_3
4	0	$-\pi/2$	0	θ_4
5	0	$\pi/2$	0	θ_5
6	0	0	310	θ_6

Fonte: Autor

Substituem-se os parâmetros na matriz genérica da transformação homogênea.

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \text{sen}\theta_1 & 460.\cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 460.\text{sen}\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1580 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \text{sen}\theta_3 & 1475.\cos\theta_3 \\ \text{sen}\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & 1475.\text{sen}\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 310 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_3^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\text{sen}\theta_4 & 0 \\ \text{sen}\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_4^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \text{sen}\theta_5 & 0 \\ \text{sen}\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_5^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\text{sen}\theta_6 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 310 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Utilizando a equação (7), obtêm-se a matriz geral da transformação homogênea do manipulador.

$$H_0^6 = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 \cdot H_3^4 \cdot H_4^5 \cdot H_5^6 \quad (24)$$

De acordo com (9), tem-se:

$$\begin{aligned} Px = & 460 * \cos(\theta_1) + 1890 * \sin(\theta_1) + 310 * \sin(\theta_5) \\ & * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) \\ & * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) \\ & * \cos(\theta_3))) + 310 * \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) \\ & * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) - 1475 \\ & * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) + 1475 * \cos(\theta_1) \\ & * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Py = & 460 * \sin(\theta_1) - 1890 * \cos(\theta_1) - 310 * \sin(\theta_5) \\ & * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) \\ & * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) \\ & * \sin(\theta_1))) + 310 * \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) \\ & * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)) - 1475 \\ & * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) + 1475 * \cos(\theta_2) \\ & * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Pz = & 1475 * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + 1475 * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2) \\ & - 310 * \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) \\ & * \sin(\theta_3)) + 310 * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) \\ & * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) + 1000 \end{aligned} \quad (27)$$

Para melhor entendimento, adota-se um valor inicial dos ângulos para poder dar sequência na resolução da cinemática inversa. Consideraram-se os seguintes valores do Quadro 4:

Quadro 4 – Valores de entrada

q	Valor
θ_1	0°
θ_2	-45°
θ_3	-30°
θ_4	180
θ_5	90
θ_6	180

Fonte: Autor

Assim, encontram-se valores para $P(q)$ e $R(q)$.

$$P(q) = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 716,5 \\ -1890 \\ -125,3 \end{bmatrix} mm \quad (28)$$

$$R(q) = \begin{bmatrix} -0,9659 & 0 & -0,2588 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0,2588 & 0 & 0,9659 \end{bmatrix} \quad (29)$$

-

3.2. Cinemática Inversa

Primeiramente, encontra-se a posição do punho pelo método de desacoplamento cinemático, por meio de (11):

$$P_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 814,8 \\ -1890 \\ -4247 \end{bmatrix} mm \quad (30)$$

Pela cinemática inversa de posição encontram-se os valores das três primeiras juntas:

$$\theta_1 = -1,1878 \text{ rad} = -68,0544^\circ$$

$$d = \sqrt{1000^2 + 460^2} = 1100,7 \text{ mm}$$

$$d_1 = 1580 + 310 = 1890 \text{ mm}$$

$$a_2 = 1580 \text{ mm}$$

$$a_3 = 1475 \text{ mm}$$

Interpreta-se d como o elo da junta 1 a 2 e d_1 como a soma do elo das juntas 2 e 3, mais o offset do elo. Substituindo na equação (14) encontram-se dois valores para θ_3 :

$$\theta_3' = 2.8842 \text{ rad} = 165.2525^\circ$$

$$\theta_3'' = 0.2574 \text{ rad} = 14.7482^\circ$$

Analisando as limitações das juntas, torna-se válido apenas θ_3'' . Utilizando este ângulo, substituindo na equação, temos:

$$\theta_2 = 0.4471 \text{ rad} = 25.6148^\circ$$

Obtidos os ângulos para as primeiras juntas, calcula-se a cinemática inversa de rotação. Reaproveitando os parâmetros DH e os ângulos da cinemática inversa de posição. Utilizando a equação.

$$R_3^6 = (R_0^3)^{-1}R \quad (31)$$

$$R(q) = \begin{bmatrix} -0,9659 & 0 & -0,2588 \\ 0 & -1 & 0 \\ -0,2588 & 0 & 0,9659 \end{bmatrix}$$

Calcula-se, R_0^3 :

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} 0,2847 & -0,9275 & 0,2420 \\ -0,7067 & -0,3737 & -0,6007 \\ 0,6477 & 0 & -0,7619 \end{bmatrix}$$

Substituindo R_0^3 e R :

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} -0,4426 & 0,7067 & 0,5519 \\ 0,8959 & 0,3737 & 0,2400 \\ -0,0366 & 0,6007 & -0,7986 \end{bmatrix}$$

Já R_3^6 obtido pelas transformações homogêneas:

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & -c6s4 - c4c5s6 & c4s5 \\ c4c6 + c5c6cs4 & c4c6 - c5s4s6 & s4s5 \\ -c6s5 & s5s6 & c5 \end{bmatrix}$$

OBS: Abreviaram-se seno para s.

Desta forma, podem-se igualar termos das matrizes para encontrar os ângulos:

$$c4s5 \neq s4s5 \neq c5 \neq 0$$

Utilizam-se as equações (22), (23) e (24) para encontrar os ângulos:

$$\theta_5' = 0,5709 \text{ rad} = 32,7102^\circ$$

$$\theta_5'' = 2,5707 \text{ rad} = 147,2903^\circ$$

O valor θ_5'' é descartado por não estar dentro do volume de trabalho.

$$\theta_4 = 0,6047 \text{ rad} = 34,6477^\circ$$

$$\theta_6 = -1,1756 \text{ rad} = -67,3583^\circ$$

Desta forma, tem-se a análise cinemática tanto a direta como a indireta. Para ambas análises vale destacar a importância do volume de trabalho, pois como citado, cada manipulador possui o seu e para a cinemática direta, as equações para as posições P_x , P_y e P_z são, particularmente, de acordo com o manipulador analisado e com valores pertencentes ao volume de trabalho. Assim como na cinemática indireta, alguns valores obtidos para os ângulos, por conta dos valores de raízes, podem ser descartados por estarem fora da faixa de trabalho dos ângulos e volume de trabalho permitido pelo manipulador.

Os valores dos ângulos são importantes para sequência de um projeto de um manipulador, pois são utilizados para cálculos de energias cinética e potencial que por sua vez, são fundamentais nos cálculos dos torques na juntas para um posterior selecionamento do atuador (elétrico, pneumático ou hidráulico) que poderá ser usado para movimentação do robô considerando também a carga.

4. CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, abordou-se a robótica desde o termo em si, contando um pouco sobre sua origem, conceitos e definições. Discorrendo sobre robôs, suas leis definidas por Asimov e sua importância para o desenvolvimento tecnológico e para a indústria 4.0.

Sobre os manipuladores, retratou-se a importância, pois são os tipos de robôs mais utilizados na indústria, com diversas aplicações, possuem diversas opções no mercado. Falou-se sobre a anatomia dos manipuladores e os tipos.

As análises cinemáticas divididas em direta e indireta foram descritas pelos métodos escolhidos para resolução. A cinemática direta utilizou da notação de Denavit-Hatenberg para resolução, obtendo as equações, que posteriormente adicionados valores de juntas pôde-se encontrar valores para as posições. Já na cinemática inversa, utilizou-se as posições encontradas na cinemática direta para o desacoplamento cinemático. Em seguida, cinemática indireta de posição e a cinemática indireta de rotação de acordo com a literatura.

Utilizou-se o MATLAB para resolução das contas, desde o desenvolvimento com as incógnitas e substituindo os valores para obtenção de resultados.

Nota-se que os métodos utilizados para a resolução, por serem padronizados, permitem-se ser utilizados não só no modelo IRB 8700, mas também em modelos de seis graus de liberdade.

Esta padronização para análises cinemáticas é de suma importância para o controle desses manipuladores. Uma análise cinemática bem feita permite que o controle do manipulador possa ser melhor executado e otimizado. De maneira a atender melhor os objetivos do uso do manipulador, com uma produtividade mais alta, padronizada, boa qualidade e mais econômica.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a realização da cinemática diferencial para que possa calcular velocidade e forças estáticas de cada junta para então desenvolvimento da análise dinâmica e, posteriormente, análise prática ou simulação para comparação de resultados.

5. REFERÊNCIAS

ABB. Product specification IRB 8700, 2021. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-8700>>.

AL-MASHHADANY, Y. I. Inverse kinematics problem (IKP) of 6-DOF manipulator by Locally Recurrent Neural Networks (LRNNs). **Management and Service Science (MASS)**, Agosto 2010.

ASIMOV, I. **Eu, Robô**. [S.l.]: [s.n.], 1950.

Capek, K. (1920). R.U.R. (Rossumovi Univerzální Roboti). Checoslováquia.

CONTEÚDO, E. **Época Negócios**, 14 Agosto 2017. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2017/08/epoca-negocios-industria-instala-15-mil-robos-por-ano.html>>.

CRAIG, J. J. **Introduction to robotics - mechanics and control**. New York: Mac Graw Hill, 2004.

DENAVIT, J. **Description and displacement analysis of mechanics based on the 2x2 dual matrices**. Evanston. 1956.

LOPES, A. M. Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estrutura em Série. **Robótica Industrial**, 2002.

MCKERROW, P.; ZIMA, H. **Introduction to Robotics**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

SILVEIRA, C. B. Citisystems. **Citisystems**, 8 agosto 2019. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/tipos-de-robos/>>.

SIMPLÍCIO, P. V. G.; LIMA, B. R.; JUNKES, J. A. MANIPULADORES ROBÓTICOS INDUSTRIAIS. **Ciências exatas e tecnológicas**, Outubro 2016. 85-94.

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. **Robot Modeling and Control**. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 1989.