



INSTITUTO FEDERAL
ESPIRITO SANTO



Robótica Industrial

Engenharia de Controle e Automação – 9º Período

PROF. LUCAS VAGO SANTANA
lucas@ifes.edu.br



Aula 02 – Conceitos Fundamentais

- A composição de um Robô Industrial;
- Características mecânicas e elétricas de um Robô Industrial;
- As juntas de um Robô Industrial;
- Principais arranjos cinemáticos de um Robô Industrial;
- Espaço de trabalho de um Robô Industrial;
- Sistemas de coordenadas de um Robô Industrial;
- Modos de programação de um Robô Industrial;
- Os graus de liberdade de um Robô Industrial;
- Conhecimentos importantes na Robótica Industrial;
- Exercícios de revisão



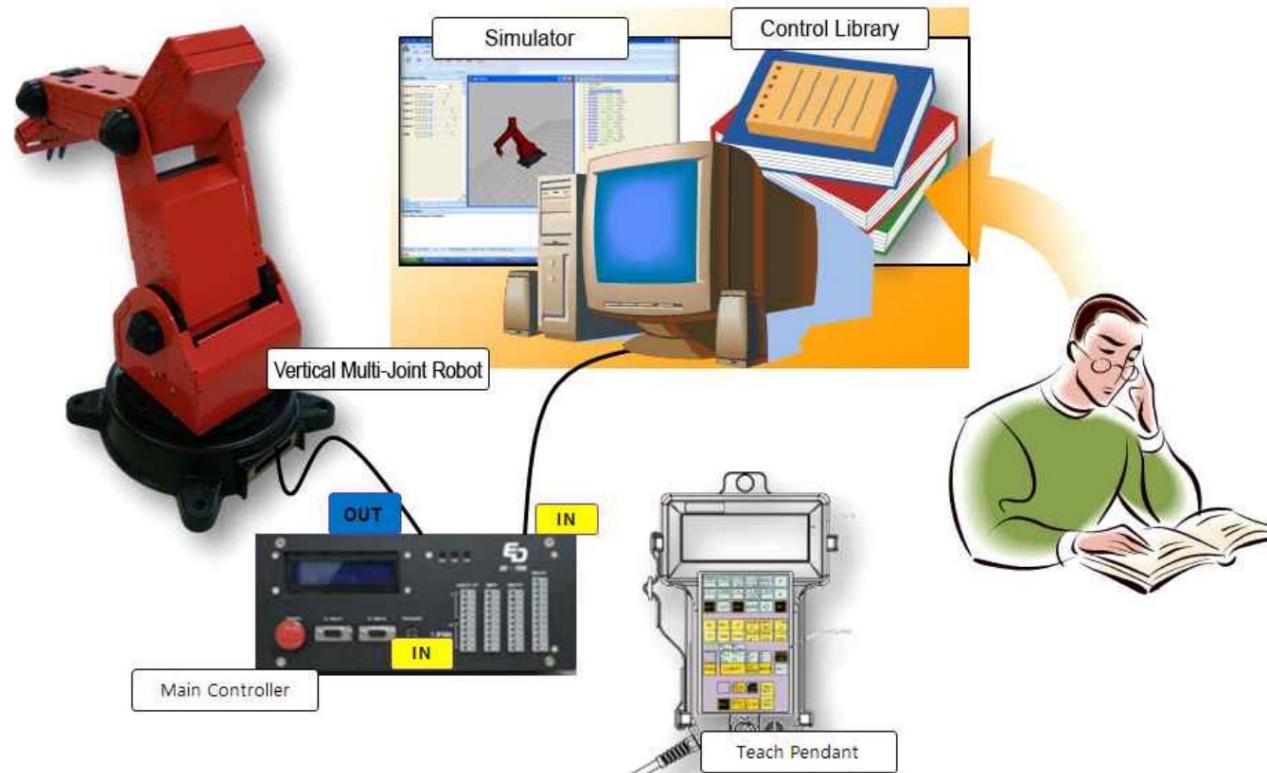
Referências Bibliográficas

- CORKE, Peter. **Robotics, Vision and Control: Fundamentals Algorithms in MATLAB**. 2. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
- CORKE, Peter. **QUT Robot Academy: The open online robotics education resource**. Disponível em: <<https://robotacademy.net.au/>>. Acesso em 27 fev. 2020.
- NIKU, Saeed B. **Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications**. 2. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth; VIDYASAGAR, M. **Robots Modeling and Control**. 1. ed. John Wiley & Sons, 2005.
- LYNCH, Kevin M.; PARK, Frank C. **Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control**. 1. ed. Cambridge University Press, 2017.
- SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer Handbook of Robotics**. 2. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.



A composição de um Robô Industrial

- Um robô é resultado da integração de vários elementos:



Fonte:
Manual do Robô ED7255



A composição de um Robô Industrial

■ O manipulador:

- Elos;
- Juntas;
- Engrenagens;
- Correias;
- Outras partes;



Fonte:
Manual do Robô ED7255

A composição de um Robô Industrial

■ O efetuador final:

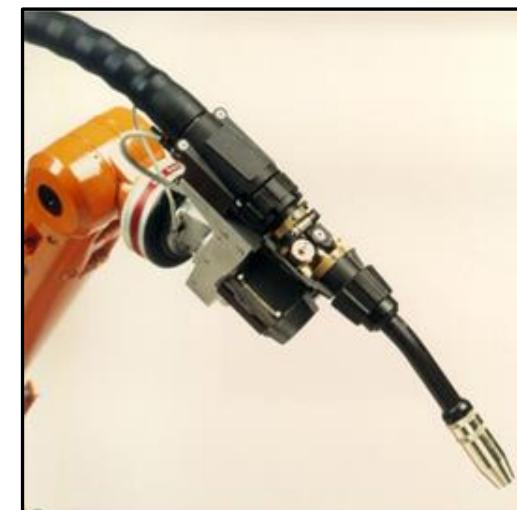
- Garra;
- Tambor/bico de spray;
- Tocha de solda;
- Ventosas;
- Outros;



<https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/15667/Whats-New-in-End-Effectors-Higher-Payload-Faster-Speed-and-Better-Safety.aspx>



<https://robodk.com/blog/robot-end-effector-guide/>

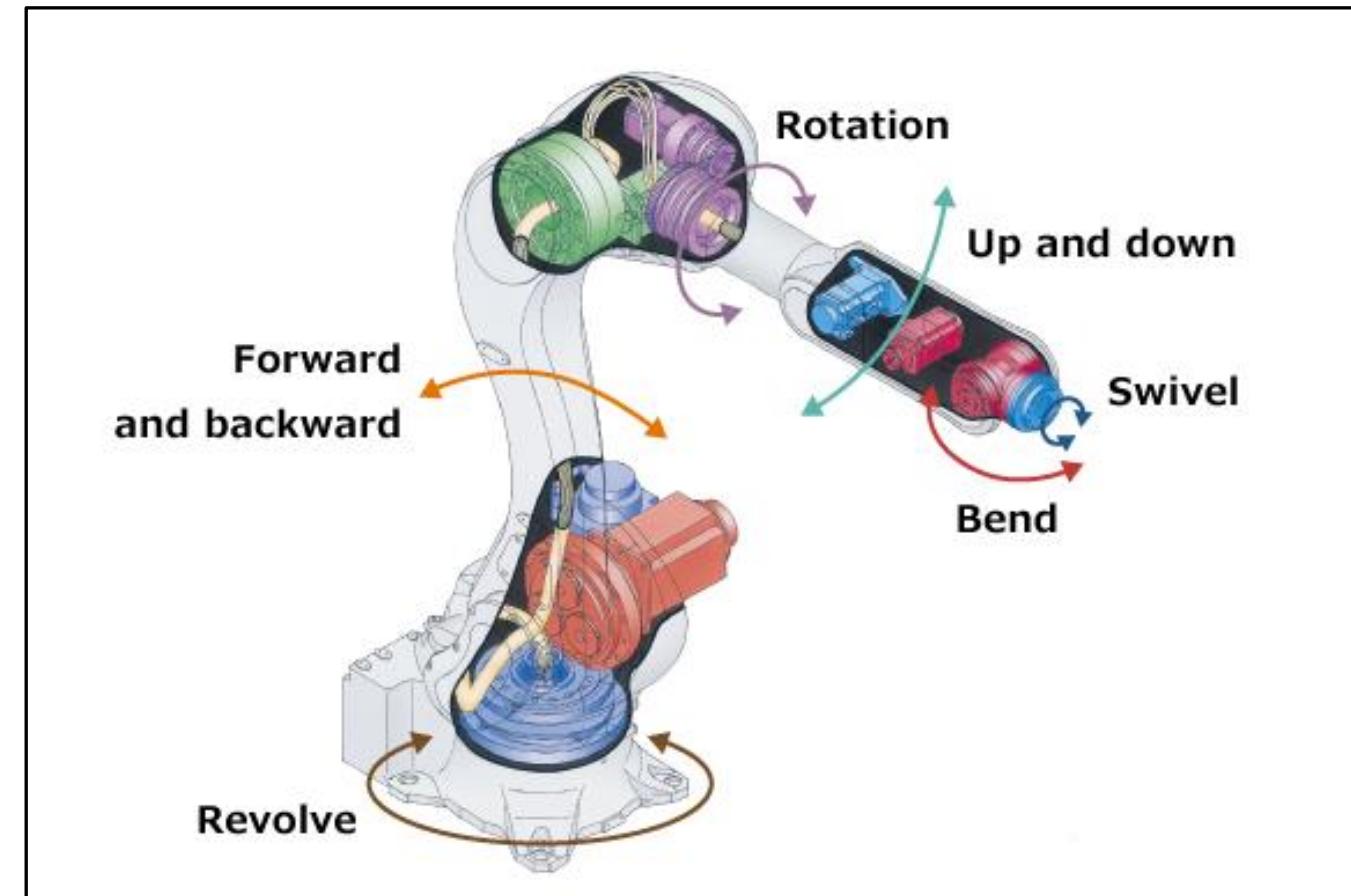


http://www.robot-welding.com/welding_torch.htm

A composição de um Robô Industrial

■ Atuadores:

- Motores Elétricos;
- Acionadores
 - Pneumáticos;
 - Hidráulicos;



<https://robotics.kawasaki.com/ja1/xyz/en/1804-03/>

A composição de um Robô Industrial

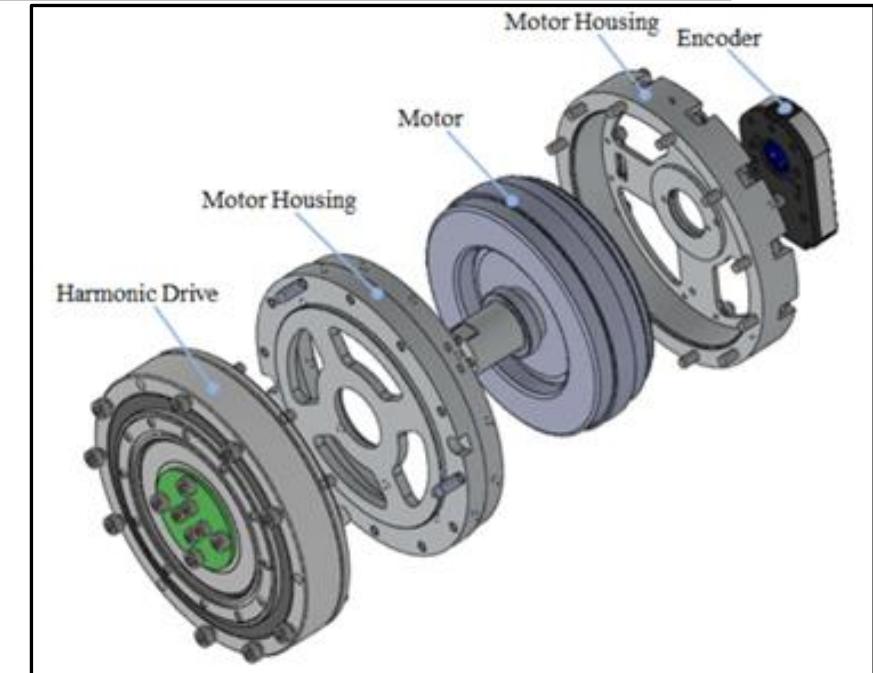
- **Sensores:**
 - Encoders;
 - RVDTs;
 - Outros;



https://www.encoder-technology.com/brand/encoder-technology/page/2/?product_count=12&product_order=desc



<https://www.moog.com/products/rotary-variable-differential-transformers--rvdts-0.html>

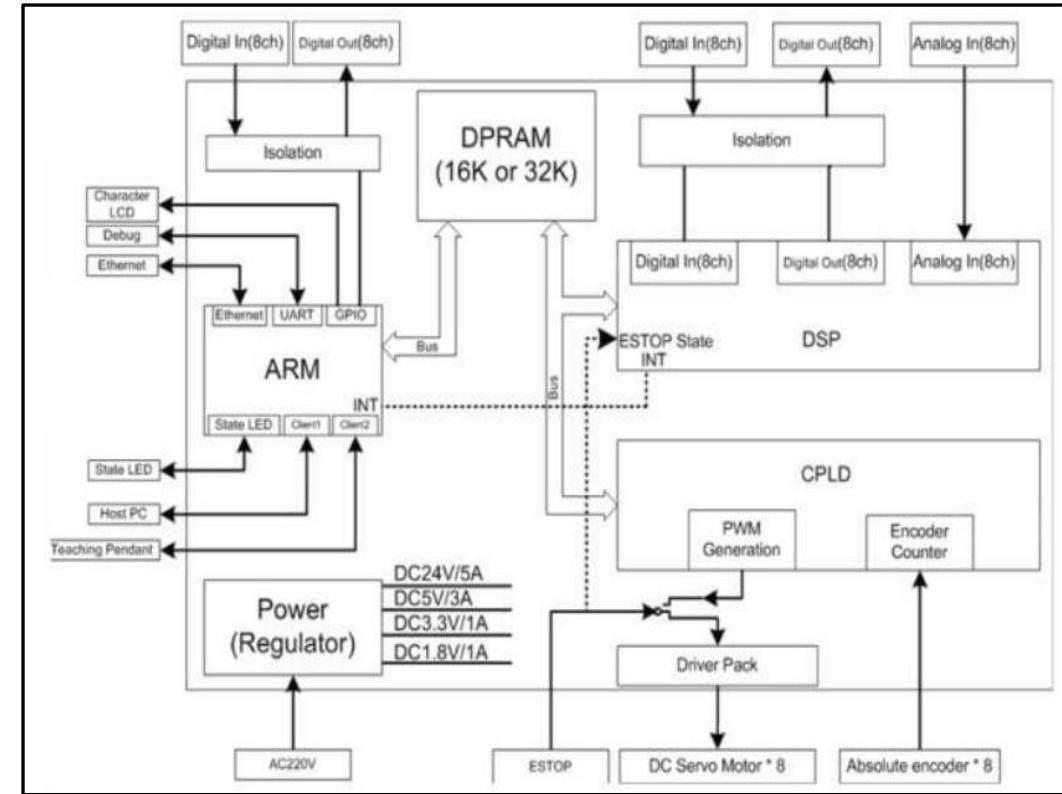
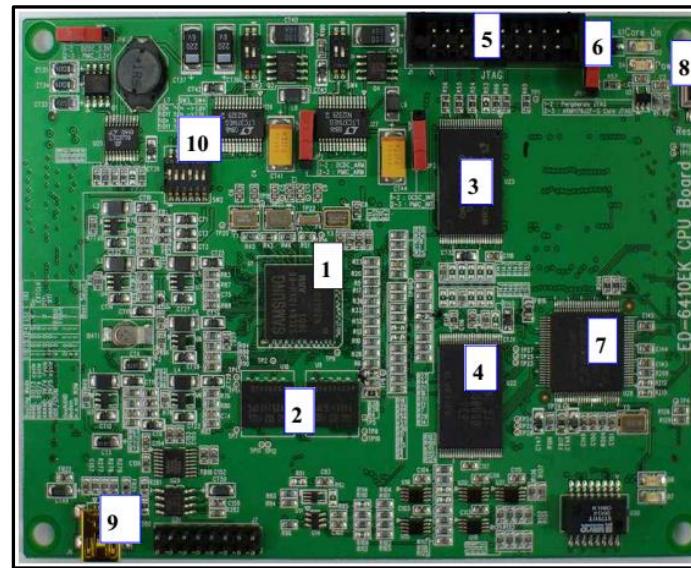


<https://journals.sagepub.com/doi/10.5772/60782>

A composição de um Robô Industrial

■ Controlador:

- Fonte de alimentação;
- Processadores de sinais;
- Conexões de I/O;
- Outros;



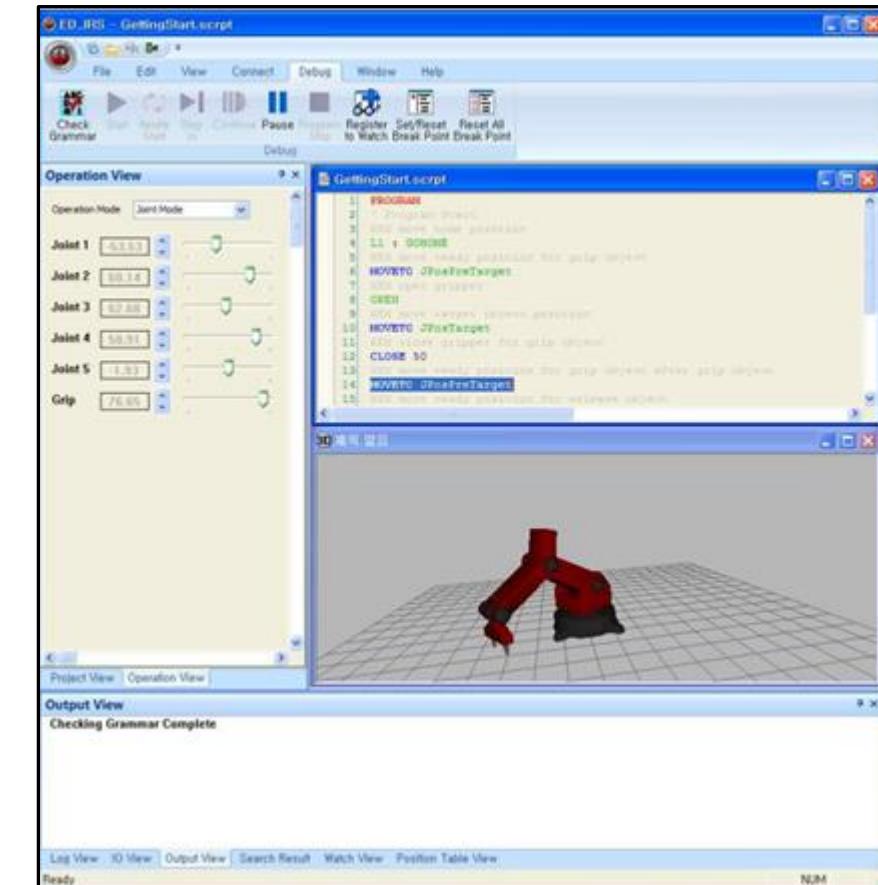
Fonte:
Manual do Robô ED7255



A composição de um Robô Industrial

■ *Teach Pendant*

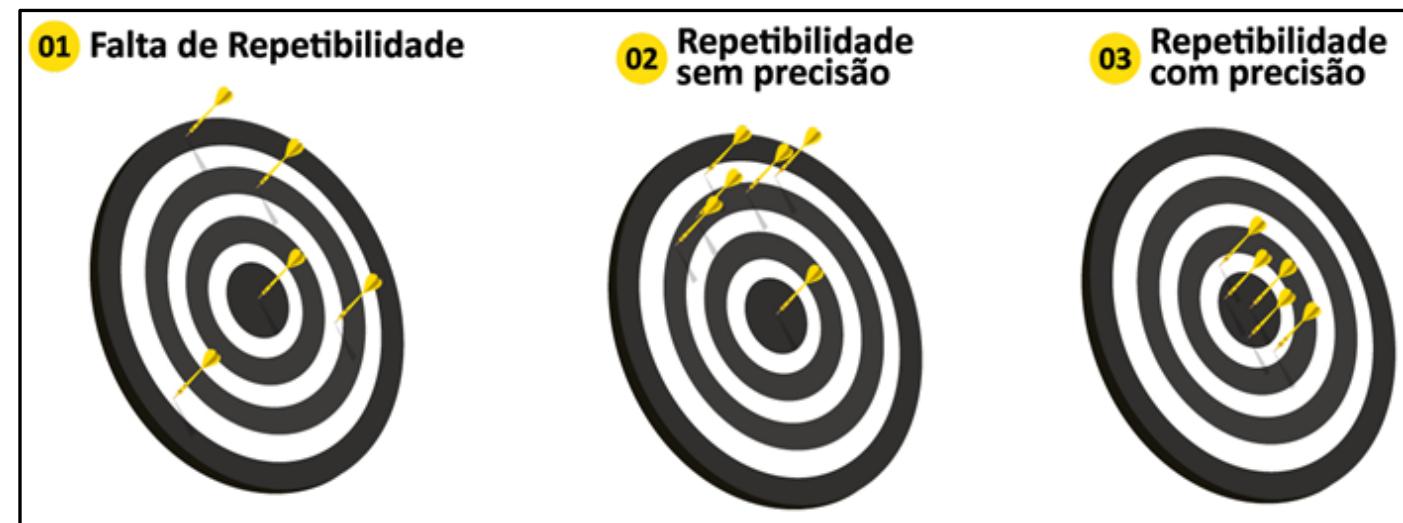
- Operação/programação;
- Monitoramento de juntas;



Fonte:
Manual do Robô ED7255

Características mecânicas e elétricas de um Robô

- Carga máxima (*payload*);
- Alcance máximo;
- Precisão;
- Repetibilidade;

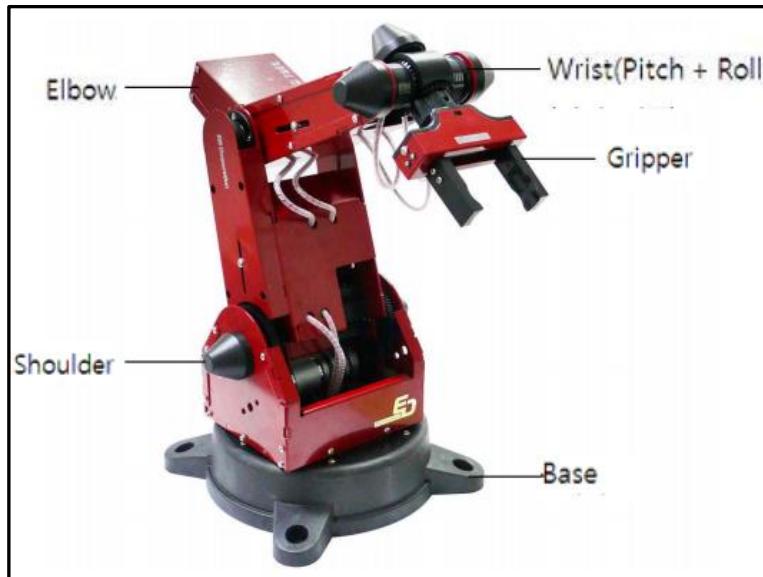


<https://velki.com.br/es/blog/aprenda-com-a-velki/qual-a-diferenca-entre-precisao--repetibilidade-e-histerese->



Características mecânicas e elétricas de um Robô

■ Robô ED-7255:



Vertical Articulated Robot Description	
Subject	Description
Construction	Vertical Articulated Arm
Number of Joint	5 Rotational Axis + 1 Gripper
Load Capacity	1.0kg
Motion Maximum Range	Axis1(Base Rotation) : $\pm 170^\circ$ Axis2(Shoulder Rotation) : $-90/+30^\circ$ Axis3(Elbow Rotation) : $0/-135^\circ$ Axis4(Wrist Pitch) : $-110/+90^\circ$ Axis5(Wrist Roll) : $\pm 160^\circ$
Robot Length	max. 802mm
Movement Maximum Speed	750mm/sec
Gripper Opening	80mm
Precision	$\pm 1.0^\circ$
Position detecting type	Absolute encoder
Homing	Absolute encoder Based
Actuator	24V DC Motor
Mass	9.5kg
Operating Temperature	2°C - 40°C

Fonte:
Manual do Robô ED7255



Características mecânicas e elétricas de um Robô

■ Robô IRB 120:



Fonte:
[Datasheet do Robô IRB 120](#)

— Specification

Robot version	Reach (m)	Handling capacity (kg)
IRB 120-3/0.6	0.58	3*
Number of axes	6	

— Technical information

Electrical Connections

Supply voltage	200-600 V, 50/60 Hz
Rated power transformer rating	3.0 kVA

Power consumption	0.24 kW
-------------------	---------

Physical

Robot base	180 x 180 mm
Robot height	700 mm
Robot weight	25 kg

— Performance (according to ISO 9283)

	IRB 120
Acceleration time 0-1 m/s	0.07 s
Position repeatability	0.01 mm

— Movement

Axis movement	Working range	Velocity IRB 120
Axis 1 rotation	+165° to -165°	250°/s
Axis 2 arm	+110° to -110°	250°/s
Axis 3 arm	+70° to -110°	250°/s
Axis 4 wrist	+160° to -160°	320°/s
Axis 5 bend	+120° to -120°	320°/s
Axis 6 turn	Default: +400° to -400° Max. rev: +242 to -242	420°/s

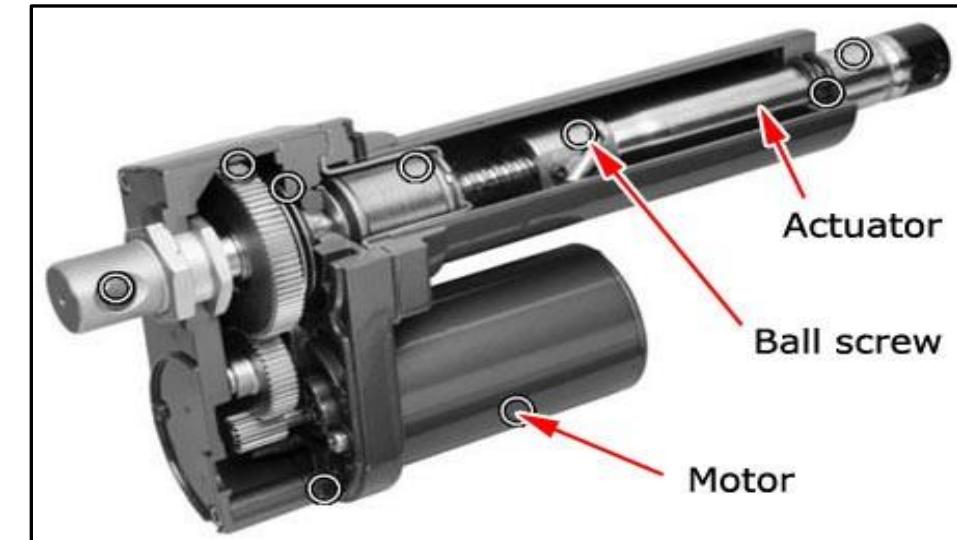
As juntas de um Robô Industrial

- Tipos:
 - Rotativas
 - Prismáticas



<https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1018>

<https://www.youtube.com/watch?v=BRIG5zAijs4>

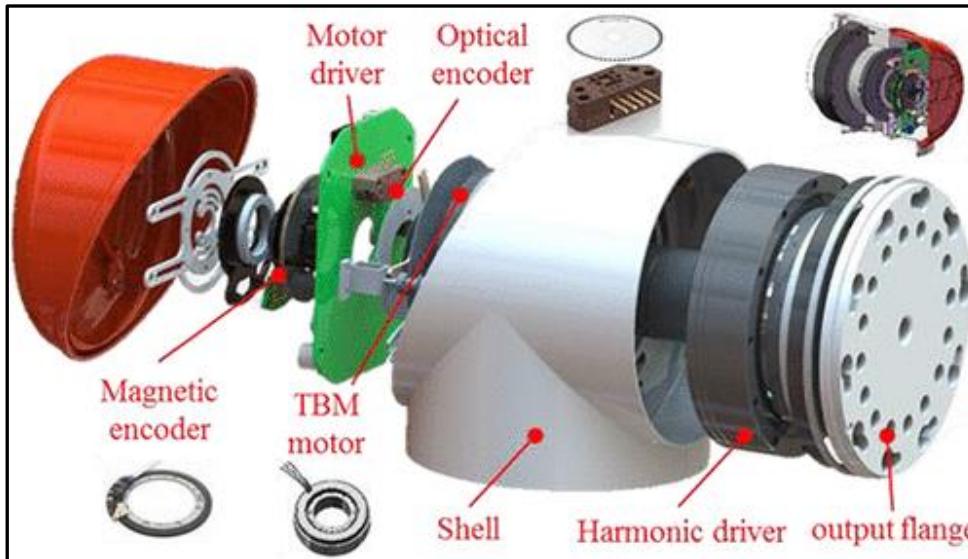


<https://www.rs-online.com/designspark/how-to-decide-between-a-pneumatic-and-an-electric-actuator>

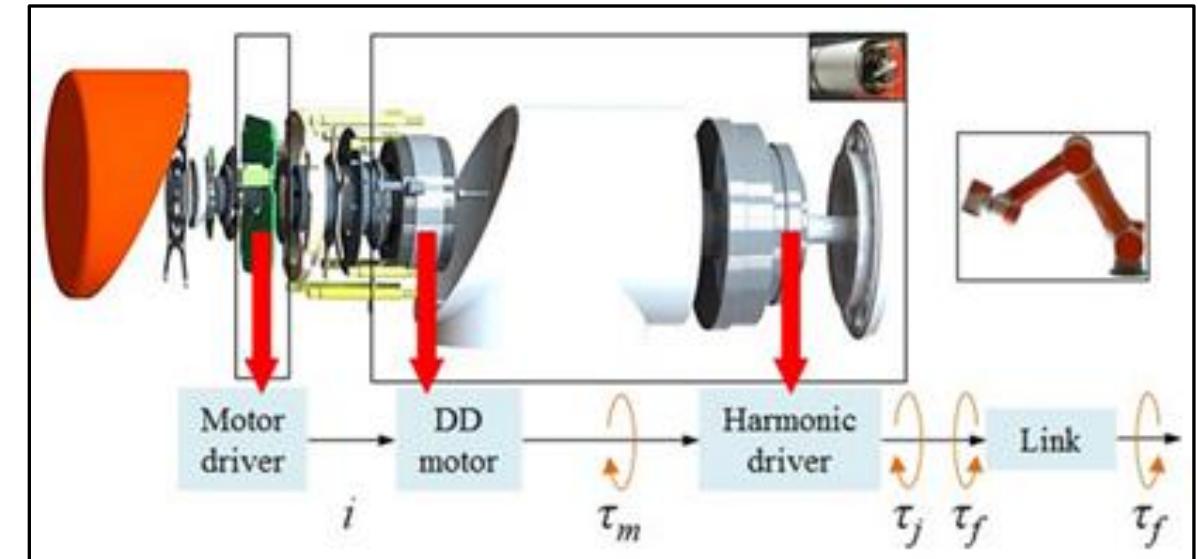


As juntas de um Robô Industrial

- Composição e controle de uma junta rotativa



<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1729881418808711>

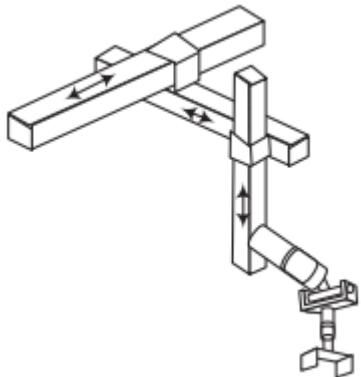


<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814017740710>

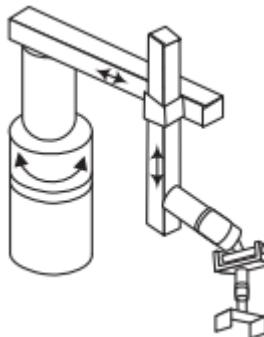


Principais arranjos cinemáticos de um Robô

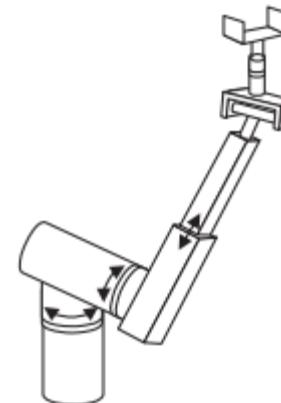
- Diferentes combinações das juntas prismáticas (P) e rotacionais (R) formam distintos arranjos cinemáticos p:



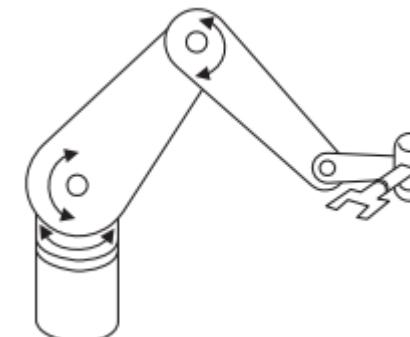
PPP (3P)
Cartesiano



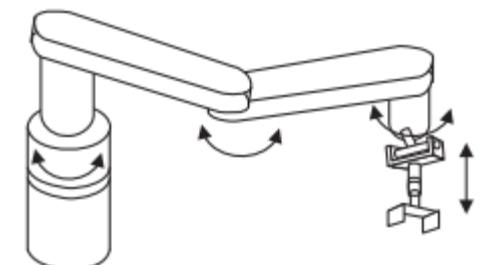
RPP (PRP)
Cilíndrico



RRP (P2R)
Esférico



RRR (3R)
Articulado ou
Antropomórfico

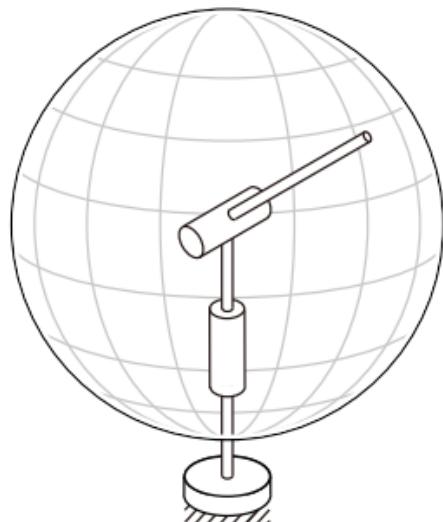


RRRP (SCARA)
Selective Compliance
Assembly Robot Arm

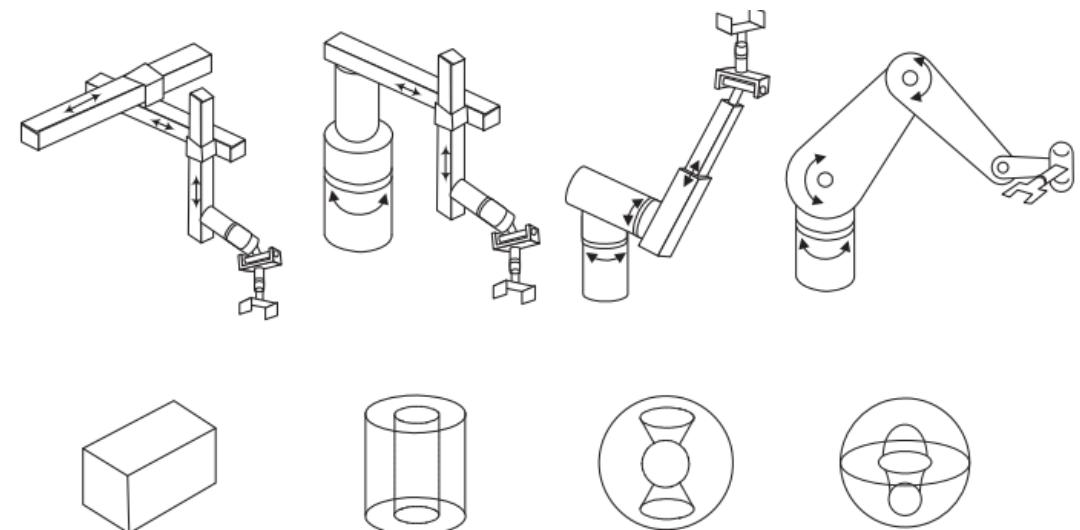


Espaço de trabalho de um Robô Industrial

- Termo associado ao alcance do efetuador final do robô;
- Depende de sua configuração de juntas e dimensões dos elos;



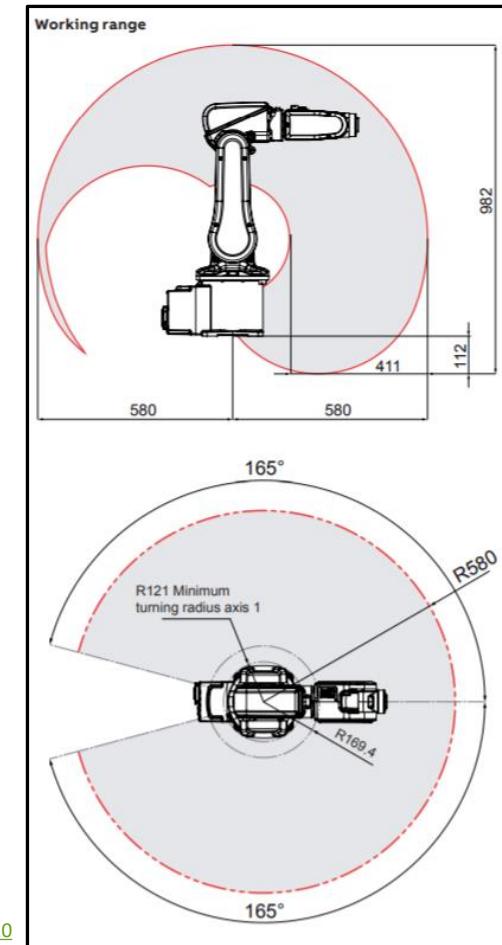
Fonte:
LYNCH e PARK, 2017



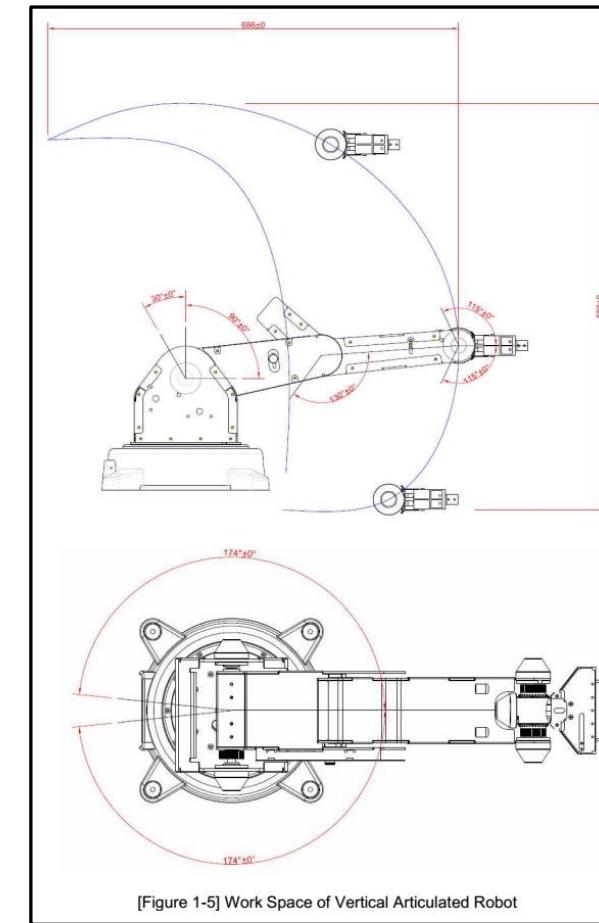
Fonte:
NIKU, 2011

Espaço de trabalho de um Robô Industrial

- Exemplos reais:
 - ABB IRB 120
 - ED 7255



Fonte:
[Datasheet do Robô IRB 120](#)



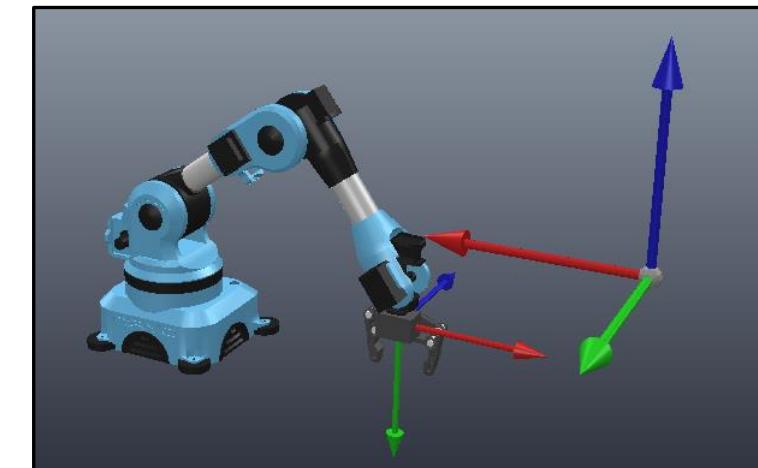
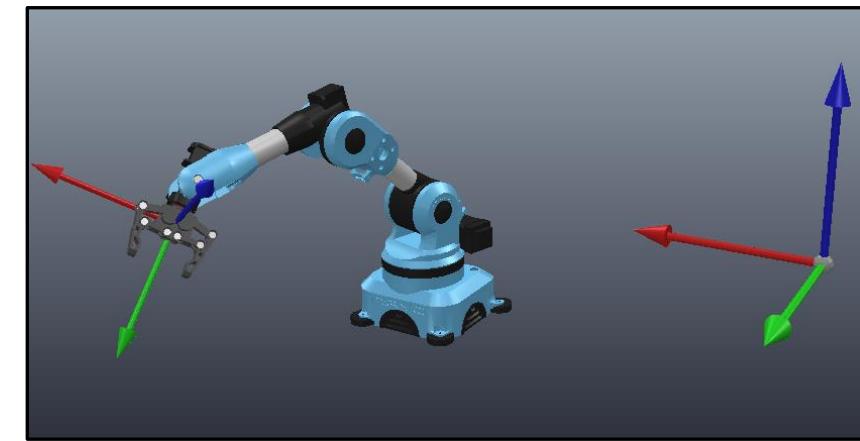
[Figure 1-5] Work Space of Vertical Articulated Robot

Fonte:
[Manual do Robô ED7255](#)



Sistemas de coordenadas do Robô Industrial

- Movimentos dos robôs são determinados em relação à diferentes sistemas de coordenadas;
- Exemplos:
 - Sistema de coordenadas do mundo (global);
 - Sistema de coordenadas da junta;
 - Sistema de coordenadas da ferramenta;





Modos de programação de um Robô Industrial

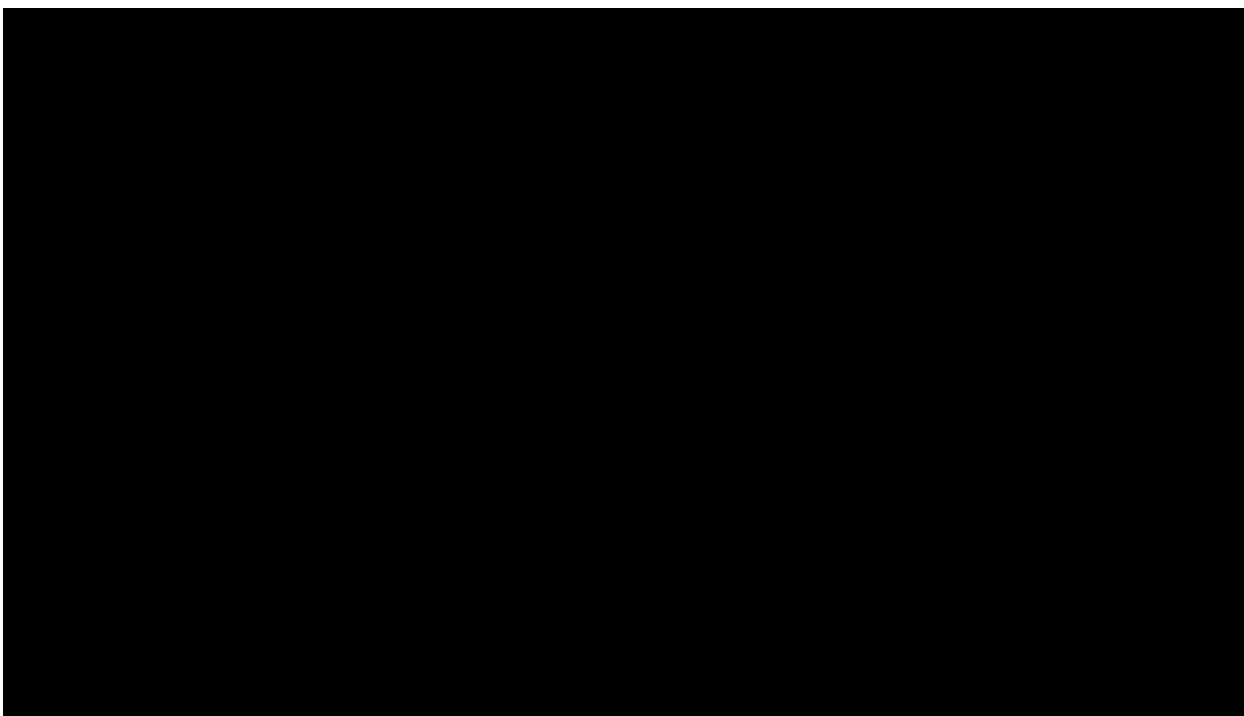
- **Physical Set-Up:**
 - Movimentos baseados em chaves de fim de curso;
- **Lead Through ou Teach Mode:**
 - As juntas são movidas individualmente com o *tech pendant* e as posições desejadas são gravadas;
 - O controlador repete as posições;
- **Continuous Walk-Through:**
 - Todas juntas são movidas **paralelamente** enquanto suas posições são continuamente gravadas;
 - O controlador repete o movimento exatamente como foi ensinado;
- **Software:**
 - Uma linguagem de programação é usada para programar as ações do robô (offline ou online);
 - O controlador executa a programação;

Fonte:
NIKU, 2011



Modos de programação de um Robô Industrial

- Exemplos:



<https://www.youtube.com/watch?v=r7gU74Yv9Es>

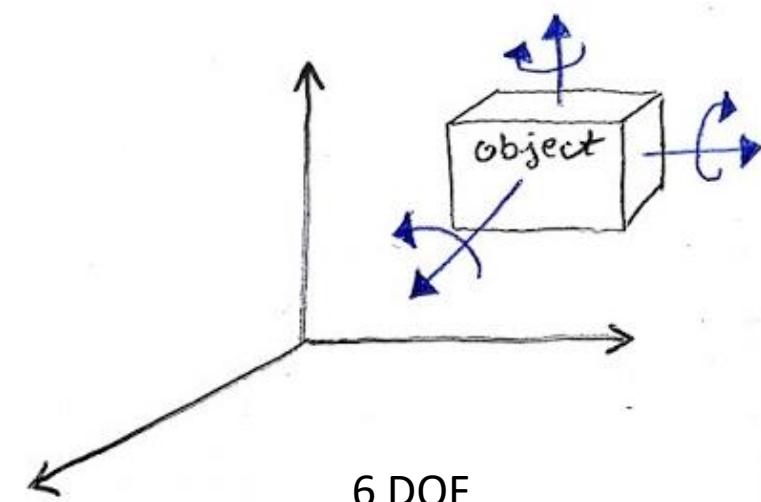
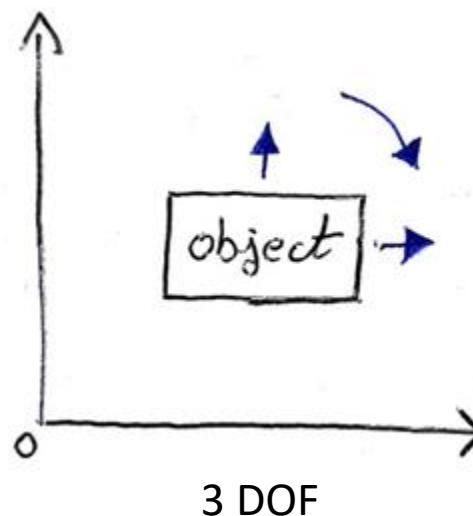
```
Pick_and_Place.script
PROGRAM
X1 : GOHOME
MOVETO JPOS1, S=30
OPEN
MOVETO JPOS2, T=3000
OPEN 15
DELAY 500
MOVETO JPOS1, S=50
MOVETO JPOS3, S=30
MOVETO JPOS4, T=2600
OPEN
MOVETO JPOS3, S=50
GOTO X1
END
```

Fonte:
Manual do Robô ED7255



Os graus de liberdade de um Robô Industrial

- Graus de Liberdade ou *Degrees of Freedom* (DOF):
 - Na mecânica clássica, significa o número mínimo de coordenadas independentes que são necessárias para representar o movimento de um objeto em um dado espaço;

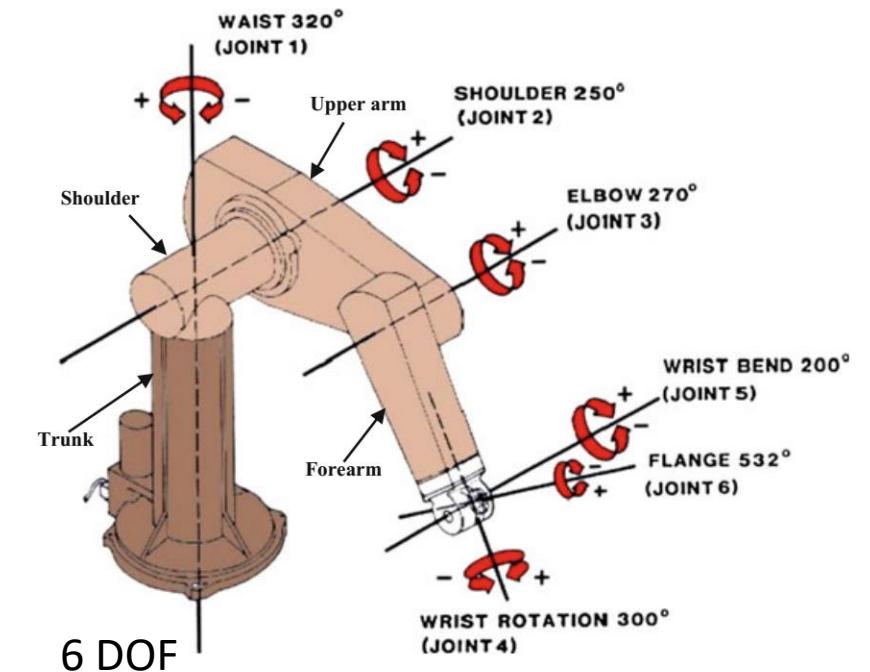
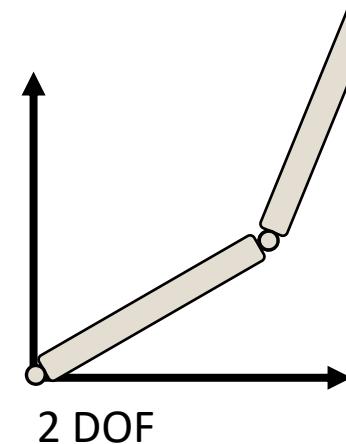
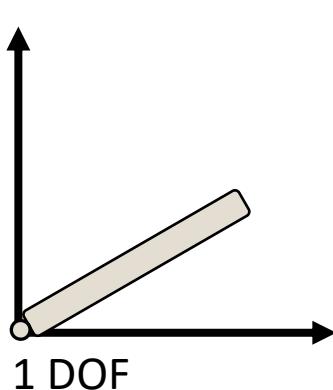


<https://modemech.blogspot.com/2018/12/degreesoffreedom-degree-of-freedom-degrees-3-d-3d-2-d-2d.html?m=1>



Os graus de liberdade de um Robô Industrial

- Na robótica industrial de manipuladores, o termo DOF é utilizado para descrever o número de juntas que compõem o mecanismo;



https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-44932-6_4



Conhecimentos importantes na Robótica Industrial

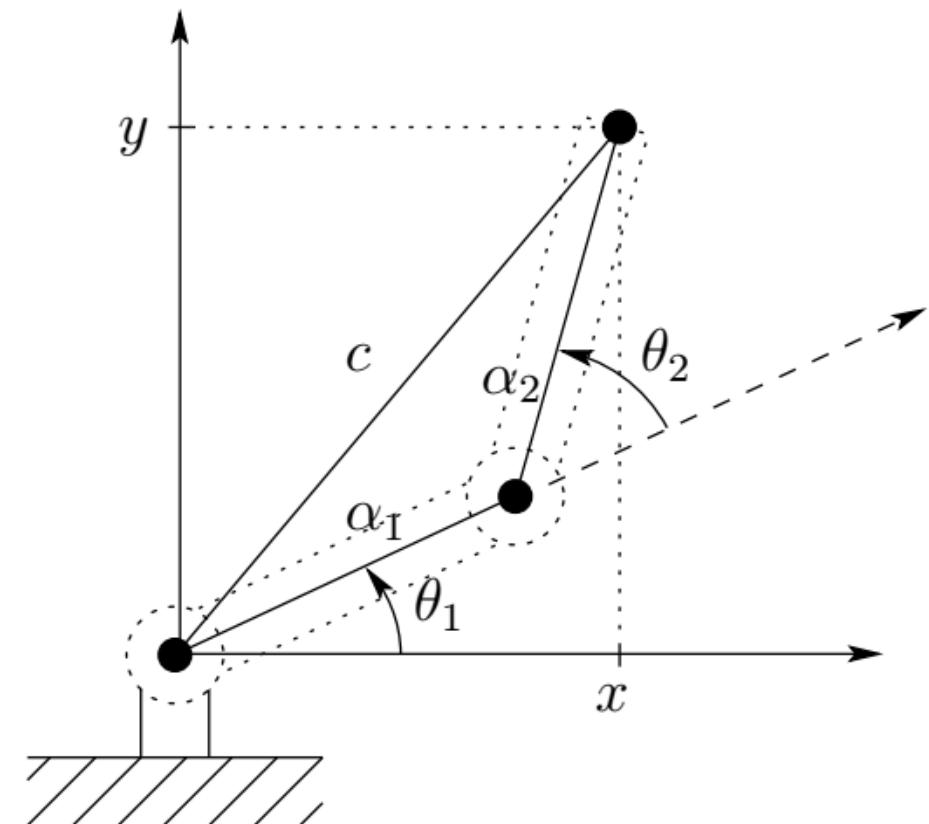
- Trigonometria (Cinemática Direta/Inversa):

$$x = \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = \alpha_1 \sin \theta_1 + \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \quad D = \frac{x^2 + y^2 - \alpha_1^2 - \alpha_2^2}{2\alpha_1\alpha_2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y/x) - \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_2 \sin \theta_2}{\alpha_1 + \alpha_2 \cos \theta_2} \right)$$





Conhecimentos importantes na Robótica Industrial

- Equações diferenciais (Cinemática de velocidade e dinâmica):

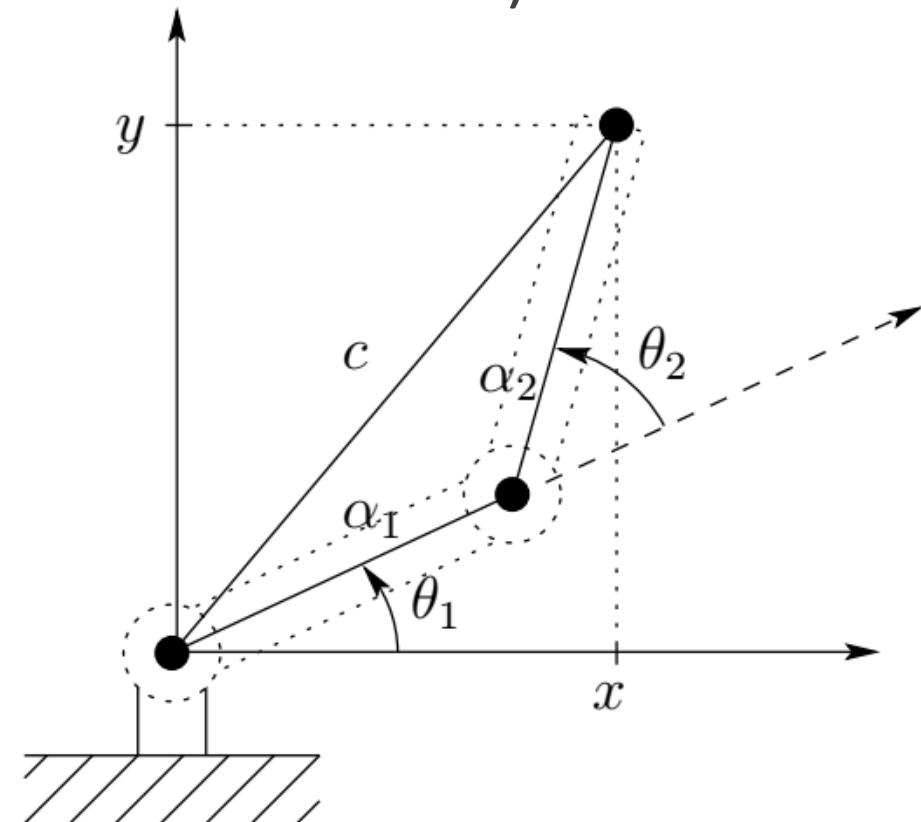
$$x = \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = \alpha_1 \sin \theta_1 + \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\dot{x} = -\alpha_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$\dot{y} = \alpha_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$





Conhecimentos importantes na Robótica Industrial

- Álgebra linear (cinemática, dinâmica, controle):

$$\dot{x} = -\alpha_1 \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 - \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$\dot{y} = \alpha_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 \sin \theta_1 - \alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\alpha_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \alpha_1 \cos \theta_1 + \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & \alpha_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \dot{\theta} = J\dot{\theta}$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}\dot{x}$$

$$J^{-1} = \frac{1}{\alpha_1 \alpha_2 s_{\theta_2}} \begin{bmatrix} \alpha_2 c_{\theta_1+\theta_2} & \alpha_2 s_{\theta_1+\theta_2} \\ -\alpha_1 c_{\theta_1} - \alpha_2 c_{\theta_1+\theta_2} & -\alpha_1 s_{\theta_1} - \alpha_2 s_{\theta_1+\theta_2} \end{bmatrix}$$



Exercícios de Revisão

Modelagem e simulação numérica de sistemas dinâmicos

- Referência bibliográfica:
 - Notas de aula de robótica móvel:
 - Aula 02 - Fundamentos da Teoria de Controle e da Simulação de Sistemas Dinâmicos
 - Disponível junto deste documento no ambiente AVA;
- Ferramentas de programação:
 - Google Colab:
 - Programação em Python na nuvem através do ambiente *Jupyter Notebook*;
 - <https://colab.research.google.com/>
 - Octave, Scilab ou Matlab também são alternativas para a solução numérica.

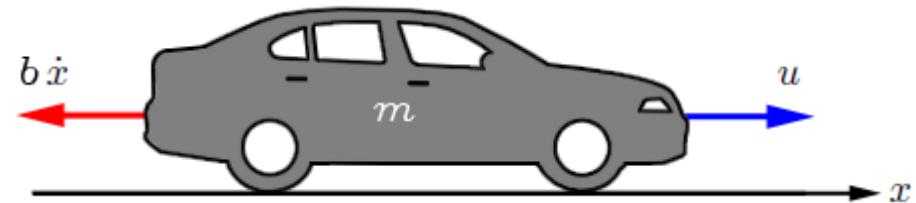


Exemplo de Simulação

- A equação diferencial a seguir é usada simular a dinâmica de movimento de um carro que está submetido a uma força de aceleração (u) e uma força de atrito linear ($b\dot{x}$) proporcional à sua velocidade de deslocamento.

- $t_0 = 0 \text{ seg}$
- $x_0 = 0 \text{ m}$
- $m = 1000 \text{ kg}$
- $b = 50 \frac{\text{N.s}}{\text{m}}$
- $u = 100 \text{ N}$

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = u$$



- Simular o problema e responder as seguintes perguntas:

- Qual será a posição deste veículo em $t = 12 \text{ seg}$? $R: \approx 5.85 \text{ m}$
- Qual será a velocidade deste veículo em $t = 22 \text{ seg}$? $R: \approx 1.34 \text{ m/s}$
- Qual a intensidade da força de arrasto em $t = 32 \text{ seg}$? $R: \approx 80 \text{ N}$



Exemplo de Simulação

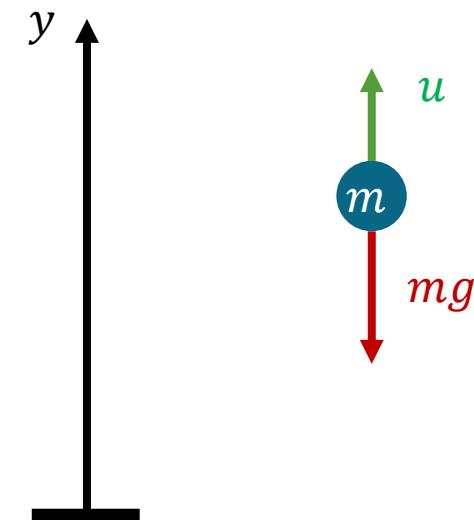
- Baixar o notebook **Exemplo_Simulacao_EDO.ipynb**;
- Executá-lo de dentro do seu ambiente **Google Colab**;
- Ou localmente usando o Python através da **IDE Spyder** ou **Jupyter Notebook** instalados junto com o **Anaconda**;
- Link de acesso à simulação:

<https://colab.research.google.com/drive/1wiUrzy8McfFyNwMlaAeP5XcR14dqFrNB>



Exercício 1

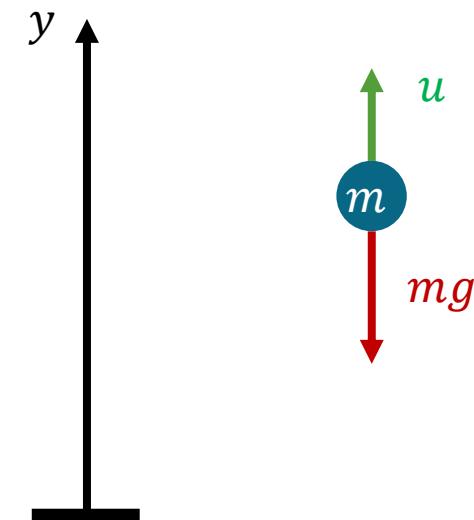
- Suponha o problema unidimensional:
 - um corpo de massa m em queda livre, sem resistência do ar que pode ser atuada por uma ação de controle u
- Proponha uma equação diferencial que o modele;
- Supondo a condição:
 - $y_0 = 1\text{ m}$;
 - $m = 0.2\text{ Kg}$;
 - $g = 9.8\text{ m/s}^2$;
 - $u = 0\text{ N}$
 - Qual será, aproximadamente, o instante em que o objeto atingirá o solo?
 - Qual será sua velocidade neste mesmo instante?





Exercício 1

- Mantendo as condições:
 - $y_0 = 1\ m$;
 - $m = 0.2\ Kg$;
 - $g = 9.8\ m/s^2$;
- Proponha um controlador u que seja capaz de levar o objeto até uma posição desejada y_d ;
- Parametrize o controlador, simulando sua resposta;





Exercício 2

- Supondo um problema bidimensional, no qual a cinemática do corpo é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

- Proponha um controlador capaz de levar o objeto até um ponto desejada $p_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix}$ do espaço.

