



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus Divinópolis
Curso de Engenharia Mecatrônica

Erick Nathan Martins Alves

Desenvolvimento de uma controladora de baixo custo para um robô manipulador didático baseada em sistema microcontrolado

Divinópolis

2024

Erick Nathan Martins Alves

**Desenvolvimento de uma controladora de baixo custo
para um robô manipulador didático baseada em sistema
microcontrolado**

Monografia de projeto final de curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Campus Divinópolis, como parte
dos requisitos para conclusão do curso de gradu-
ação em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso

Coorientador: Prof. Dr. Alan Mendes Marotta

Divinópolis

2024

Catalogação em Preparação - Biblioteca Universitária - Campus Divinópolis - CEFET-MG

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu telus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Bibliotecário Responsável:

Note: A ficha catalográfica definitiva será incluída SOMENTE na versão final da monografia do Projeto Final de Curso ao final das atividades de PFC II.

Erick Nathan Martins Alves

Desenvolvimento de uma controladora de baixo custo para um robô manipulador didático baseada em sistema microcontrolado

Monografia de projeto final de curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Campus Divinópolis, como parte
dos requisitos para conclusão do curso de gradu-
ação em Engenharia Mecatrônica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso
Orientador

Prof. Dr. Adriano Nogueira Drumond Lopes
Convidado

Prof. Dr. Cláudio Henrique Gomes dos Santos
Convidado

Divinópolis, DIA de MÊS de ANO DE DEFESA (PFC II):

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos que acreditam...

Agradecimentos

Os agradecimentos vão para...

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo projetar e desenvolver uma controladora para o manipulador robótico de 5 GDL e uma garra presente no laboratório de robótica: o ED-7255. O modelo educacional a ser utilizado possui uma controladora nativa, porém com recursos limitados e que apresenta acúmulo de erros de posicionamento. Propõe-se então a implementação de um sistema de controle independente por junta, com a utilização de processamento paralelo baseado em sistema microcontrolado. Assim, pretende-se aproveitar a estrutura e construção mecânica do robô, buscando melhorias e uma maior variedade de recursos, como a possibilidade de uma IHM moderna, conexão *wireless* e até mesmo uma programação aberta, em linguagens de alto nível e de propósito geral, como o *Python*, por exemplo. Visando um *hardware* compacto, de baixo custo e eficiente, foi escolhido o ESP32-S3 como microcontrolador principal, possibilitando a implementação dos modos de programação pretendidos: manual ou automático. O desenvolvimento inclui a obtenção dos modelos cinemáticos direto e inverso do manipulador, além do controle de posição dos motores CC presentes no modelo utilizado, a fim de implementar uma biblioteca que encapsulará as funções de movimentação do robô, de modo similar ao utilizado em controladoras industriais. Este trabalho desempenha o importante papel de aproximar a robótica industrial do aluno e viabilizar aplicações educacionais práticas e com uma maior liberdade e abertura de interação com o *hardware*, possibilitando assim, um melhor entendimento, aplicação e visualização real de conceitos relacionados a modelagem, planejamento e controle de manipuladores robóticos.

Palavras-chaves: Robótica industrial; Controle independente por junta; Sistemas microcontrolados; Modelos didáticos; Eletrônica.

Abstract

The present work aims to design and develop a controller for the 5-DOF robotic manipulator with a gripper present in the robotics laboratory: the ED-7255. The educational model to be used has a native controller, but it has limited resources and presents positioning error accumulation. It's proposed to implement an independent joint control system, using parallel processing based on a microcontrolled system. Thus, the main goal is to take the structure and mechanical construction of the robot, seeking improvements and a greater variety of resources, such as the possibility of a modern HMI, wireless connection and even an open programming, in high-level and general-purpose languages, such as Python, for example. Aiming at a compact, low-cost and efficient hardware, the ESP32-S3 was chosen as the main microcontroller, enabling the implementation of the intended programming modes: manual or automatic. The development includes obtaining the direct and inverse kinematic models of the manipulator, in addition to controlling the position of the DC motors present in the model used, in order to implement a library that will encapsulate the robot's movement functions, similar to that used in industrial controllers. This work plays the important role of bringing industrial robotics closer to the students and enables practical educational applications with greater freedom and openness of interaction with the hardware, thus allowing a better understanding, application and real visualization of concepts related to modeling, planning and control of robotic manipulators.

Keywords: Industrial robotics; Independent joint control; Microcontrolled systems; Didactic models; electronics.

Listas de ilustrações

Figura 1.1 – Diagrama geral do sistema proposto.	3
Figura 1.2 – Estrutura mecânica do ED-7255.	4
Figura 1.3 – Controladora original do modelo educacional.	4
Figura 1.4 – Espaço de trabalho do manipulador.	5
Figura 1.5 – Desenho técnico mecânico do manipulador.	6
Figura 1.6 – <i>Encoder</i> magnético absoluto MA3 (US DIGITAL, 2017).	6
Figura 1.7 – Tensão média de saída do encoder em função do ângulo mensurado. . . .	7
Figura 2.1 – Diagrama geral de um sistema robótico.	9
Figura 2.2 – Diagrama esquemático da controladora industrial <i>C5G</i> (COMAU ROBOTICS, 2014).	13
Figura 2.3 – Circuito do inversor trifásico utilizado nos módulos <i>ACOPOSmulti</i> (B&R, 2024).	14
Figura 2.4 – Circuito RC que atua como filtro passa-baixas.	22
Figura 2.5 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixas de primeira ordem.	23
Figura 2.6 – Resposta de um filtro passa-baixas quando submetido a um sinal <i>PWM</i> . .	23
Figura 2.7 – Relação entre o tempo de acomodação, o <i>ripple</i> e a constante de tempo do filtro.	24
Figura 2.8 – Circuito equivalente de um motor de corrente contínua (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).	25
Figura 2.9 – Esquemático de um atuador CC (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).	25
Figura 2.10–Diagrama de blocos de um atuador de corrente contínua.	26
Figura 3.1 – Conectores e cabeamento da base comprometidos.	28
Figura 3.2 – Teste e análise dos sinais dos <i>encoders</i>	29
Figura 3.3 – Manutenção das conexões com a controladora e o <i>Teach Pendant</i>	29
Figura 3.4 – Processo de troca da lubrificação das reduções planetárias.	29
Figura 3.5 – Peça usinada para acoplamento do <i>encoder</i> à junta 1.	30
Figura 3.6 – Diagrama de arame do ED-7255.	31
Figura 3.7 – Desacoplamento cinemático.	33
Figura 3.8 – Plano de trabalho do robô.	34
Figura 3.9 – Curvas de posição, velocidade e aceleração no espaço de juntas. . . .	38
Figura 3.10–Transitório da corrente de armadura dos motores, observado com rotor bloqueado: a) Para o motor 1 e b) Para o motor 2.	41
Figura 3.11–Velocidade nominal dos motores mensurada com um tacômetro digital: a) Para o motor 1 e b) Para o motor 2.	41

Figura 3.12–Resposta do sistema modelado: a) Para o motor 1 e b) Para o motor 2.	43
Figura 3.13–Diagrama de módulos e sinais da controladora proposta.	44
Figura 3.14–Diagrama de <i>pinout</i> do <i>ESP32-S3 DevKitC-1</i> (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024b).	45
Figura 3.15–Circuito para leitura dos <i>encoders</i> .	46
Figura 3.16–Resposta dos filtros passa-baixas em cascata (3 ^a ordem).	47
Figura 3.17–Circuito de potência para acionamento dos motores.	48
Figura 3.18–Circuito para leitura de corrente dos motores.	48

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Informações técnicas do manipulador.	5
Tabela 1.2 – Especificação dos <i>links</i> do robô.	5
Tabela 3.1 – Tabela de Denavit-Hartenberg	32
Tabela 3.2 – Macros utilizadas para os cálculos e discretização das trajetórias.	39
Tabela 3.3 – Dados experimentais obtidos por meio de ensaios nos motores.	42
Tabela 3.4 – Mapeamento das <i>GPIO's</i> para o projeto.	45

Lista de abreviaturas e siglas

GDL	Grau de Liberdade
IHM	Interface Homem-Máquina
CC	Corrente Contínua
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
TP	<i>Teach Pendant</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
BLDC	<i>BrushLess-DC</i>
CA	Corrente Alternada
APC	<i>Acopos Personal Computer</i>
PPS	<i>Passive Power Supply</i>
IAM	<i>Inverter Axis Module</i>
SDM	<i>Safety & Distribution Module</i>
MIMO	<i>Multiple-Input-Multiple-Output</i>
SISO	<i>Single-Input-Single-Output</i>
MCD	Modelo Cinemático Direto
D-H	<i>Denavit-Hartenberg</i>
CG	Centro de Gravidade
LPF	<i>Low Pass Filter</i>
EDO	Equação Diferencial Ordinária
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
RB	Rotor Bloqueado (ensaio)

VZ	A vazio (ensaio)
SS	<i>Steady State</i> (regime permanente)
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
ADC	<i>Analog-Digital Converter</i>
GND	<i>Ground</i>
TJB	<i>Transistor de Junção Bipolar</i>
CI	<i>Circuito Integrado</i>

Lista de símbolos

A_i	i-ésima matriz de <i>Denavit-Hartenberg</i>
n	número de juntas / ordem do sistema / grau do polinômio
H_b^a	matriz de transformação homogênea de b , em relação a a
H_T	matriz de transformação homogênea alvo (<i>target</i>)
o	vetor de translação
R_b^a	matriz de rotação de b , em relação a a
(a, e, r)	ângulos de Euler equivalente às rotações <i>ZYZ</i> , no <i>frame</i> corrente, a partir da base
d	deslocamento do último <i>link</i> do punho a ser desacoplado
(x_c, y_c, z_c)	coordenadas do centro do punho esférico
ξ	vetor de velocidades lineares e angulares no espaço cartesiano
q	variável de junta, no espaço articular
$J(q)$	matriz jacobiano
z_i	vetor de projeção do i-ésimo eixo z sobre o <i>frame</i> referencial da base
ω	velocidade angular
kt_i	energia cinética do i-ésimo <i>link</i>
m_i	massa do i-ésimo <i>link</i>
ka_i	energia potencial do i-ésimo <i>link</i>
I_i	momento de inércia do i-ésimo <i>link</i>
$D(q)$	matriz de inércia
$C(q)$	matriz de Coriolis
p_i	energia potencial gravitacional do i-ésimo <i>link</i>
g	aceleração da gravidade local
\vec{g}_0	vetor de projeção da gravidade sobre o <i>frame</i> referencial da base

$G(q)$	matriz de efeito gravitacional
τ_i	torque da i-ésima junta
f_i	força da i-ésima junta
a_i	i-ésimo coeficiente do polinômio
t_0	tempo inicial
t_f	tempo final
q_0	posição articular inicial
q_f	posição articular final
$G_{LPF}(s)$	função de transferência do filtro passa-baixas de primeira ordem
f_c	frequência de corte
τ	constante de tempo do sistema
V_{in}	tensão de entrada
V_{out}	tensão de saída
R	valor da resistência
L	valor da indutância
C	valor da capacitância
V_{med}	tensão média
V_t	tensão aplicada aos terminais do motor
I_a	corrente de armadura
V_b	força contra-eletromotriz induzida
J	momento de inércia do atuador
B	coeficiente de atrito viscoso (fricção) do atuador
k_a	constante construtiva da máquina CC
ϕ	fluxo magnético da máquina CC
τ_m	torque do motor
τ_l	torque no link

r	razão de redução das engrenagens do atuador
\mathcal{L}	transformada de Laplace
$G_m(s)$	função de transferência do modelo simplificado de um motor CC
ϕ	diâmetro do eixo
θ_i	rotação no eixo z_{i-1}
d_i	deslocamento no eixo z_{i-1}
a_i	deslocamento no eixo x_i
α_i	rotação no eixo x_i
l_i	comprimento do i-ésimo <i>link</i>
c_θ	coseno de θ
s_θ	seno de θ
r_{ij}	elemento da i-ésima linha, j-ésima coluna da matriz de rotação
$\vec{\delta}$	vetor de deslocamento
Rt	resistência entre os terminais do motor
V_{shunt}	tensão de <i>shunt</i> (sobre o resistor <i>shunt</i>)
R_{shunt}	valor da resistência de <i>shunt</i>
M_i	i-ésimo motor
N	rotação do motor
ST	<i>Settling Time</i> (tempo de acomodação)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Definição do Problema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	O Robô Manipulador ED-7255	3
1.4	Contribuições e Publicações	7
1.5	Organização	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Caracterização da Área	9
2.2	Fundamentação Teórica	14
2.2.1	Cinemática de Manipuladores	15
2.2.1.1	Cinemática Direta	15
2.2.1.2	Cinemática Inversa	16
2.2.1.3	Cinemática Diferencial	17
2.2.2	Modelagem Dinâmica de Manipuladores	19
2.2.3	Planejamento e Geração de Trajetória	21
2.2.4	Filtro Passa-Baixas Analógico	22
2.2.5	Atuadores de Corrente Contínua	24
2.2.6	Controle de Potência por Chaveamento	27
2.2.7	<i>Feedforward Control</i>	27
2.2.8	Controlador PID	27
2.2.9	Comunicação MQTT	27
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Manutenção	28
3.2	Modelagem Cinemática	30
3.2.1	Modelo Cinemático Direto	31
3.2.2	Modelo Cinemático Inverso	32
3.2.3	Cinemática Diferencial	36
3.3	Modelagem Dinâmica	36
3.4	Planejamento e Geração de Trajetória	37
3.5	Modelagem dos Atuadores	40
3.6	Hardware	44
3.7	Projeto e Sintonia do Controlador	49
3.8	Software e Firmware	49

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1	Conclusão	51
5.2	Sugestões de Continuidade	51
	REFERÊNCIAS	52

1 Introdução

Neste capítulo o trabalho será melhor caracterizado e os objetivos gerais e específicos definidos. Outrossim, são apresentados os dispositivos e mecanismos alvos do trabalho, as contribuições e publicações, e a organização do documento.

1.1 Definição do Problema

A robótica é um campo relativamente novo de tecnologia moderna que atravessa os limites da engenharia. Compreender a complexidade dos robôs e suas aplicações requerem conhecimentos de engenharia elétrica, engenharia mecânica, sistemas e engenharia industrial, ciência da computação, economia e matemática. Novas disciplinas de engenharia, como engenharia de produção, engenharia de aplicações e engenharia do conhecimento surgiram para lidar com a complexidade do campo da robótica e da automação industrial (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

Nesse âmbito, os modelos robóticos educacionais têm sido amplamente difundidos e utilizados com o objetivo de viabilizar o estudo da robótica nas universidades e centros de ensino. A vantagem de plantas e protótipos é a possibilidade de aplicar na prática os conhecimentos vistos, através de dispositivos mecatrônicos que possuem funcionamento similar aos manipuladores industriais comerciais.

Dessa forma, é possível o estudo de princípios cinemáticos e dinâmicos do robô, bem como a programação dos mesmos, sem a exigência de se possuir modelos renomados, como os da *Comau*, *Kuka* ou *ABB*, por exemplo. Ademais, os fabricantes citados possuem lógica de controle fechada e protegida sob direitos autorais, não sendo possível visualizá-las ou, por consequência, modificá-las. Nesse aspecto, os modelos didáticos podem ser mais flexíveis e, além de possibilitar uma implementação de mais baixo nível (livre e de total controle), pode servir ainda como um intermédio para o avanço no campo da robótica, ou seja, um estudo mais detalhado a cerca do controle do robô para, posteriormente, iniciar os trabalhos em um robô fechado e utilizado em meio industrial.

O modelo educacional *ED-7255* presente no laboratório de robótica do CEFET-MG de Divinópolis, encontrava-se subaproveitado, em virtude de defeitos elétricos e mecânicos. Em um primeiro momento, houve a necessidade de realizar a manutenção do manipulador. Foi sugerido ainda, o desenvolvimento de uma controladora com o objetivo de corrigir alguns problemas observados no modelo, como a instabilidade do controle de posição, bem como a baixa precisão e repetibilidade. Ademais, a inserção de novas ca-

racterísticas ao projeto, como a ampliação e modernização da IHM (Interface Homem Máquina) e conectividade, visam um ganho de possibilidades e recursos didáticos oferecidos pelo sistema.

Em 1934, Hazen, que introduziu o termo servomecanismos para sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relé, capazes de acompanhar uma variação de entrada com acurácia. Durante a década de 1940, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) possibilitaram aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido. Muitos sistemas de controle industrial das décadas de 1940 e 1950 usavam controladores PID no controle de posição, pressão, temperatura, etc (OGATA, 2010).

Foi proposto então, a partir das ferramentas supracitadas, a implementação de um servomecanismo com controle PID independente por junta, visando uma resposta mais estável e com maior acurácia, com a sintonia individual dos controladores, a partir da comparação de modelos caixa cinza e caixa preta e a seleção do melhor desempenho para aplicar ao sistema proposto.

1.2 Objetivos

O objetivo principal é o desenvolvimento de um sistema de controle para o manipulador robótico em questão, retomando conceitos de eletrônica, robótica, sistemas digitais e controle, com a finalidade de aprimorar a controladora original em aspectos como: acurácia, repetibilidade, recursos disponíveis para o aprendizado, interface homem-máquina e até mesmo propor um sistema/técnica de controle distinto do empregado nativamente no modelo.

São objetivos específicos:

- Garantir o pleno funcionamento do manipulador (mecânica e elétrica);
- Obter os modelos cinemáticos do ED-7255;
- Obter os modelos caixa cinza dos motores CC;
- Projetar, sintonizar e simular os controladores PID;
- Projetar e desenvolver as unidades de controle microcontroladas independentes;
- Projetar e desenvolver a unidade central e controladora como um todo;
- Implementar *software* e *firmware*: programação embarcada no ESP32 e IHM.

Assim, a topologia básica do sistema proposto segue conforme diagrama mostrado na Figura 1.1.

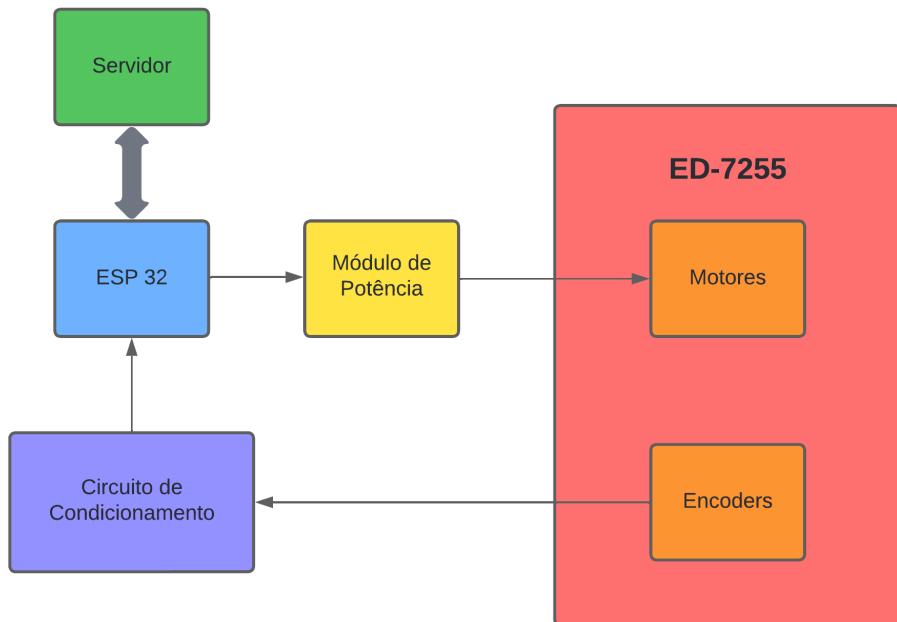


Figura 1.1 – Diagrama geral do sistema proposto.

1.3 O Robô Manipulador ED-7255

Um sistema robótico utilizado em meio industrial é composto por um braço mecânico, um controlador baseado em computador, uma ferramenta na extremidade do efetuador e um terminal de comando. O kit educacional ED-7255 foi desenvolvido como um equipamento dedicado ao meio acadêmico, incluindo todos os elementos de um sistema robótico industrial real, ou seja, um corpo principal do manipulador, uma controladora dedicada, uma garra fixa à extremidade do efetuador, um terminal de controle e um *software* básico para programação (ED-CORPORATION, 2010).

O *hardware* do manipulador é composto basicamente pela estrutura mecânica (base e *links*), sensores (*encoders*), atuadores baseados em motores de corrente contínua e uma garra na extremidade do efetuador, conforme Figura 1.2.

A controladora de um robô é um conjunto de dispositivos e componentes que viabilizam o controle e a operação de um manipulador robótico. Industrialmente, estes equipamentos podem ser compostos por CLP's, inversores de frequência, conversores de potência, unidades de arrefecimento, terminal de comando (*Teach Pendant*), etc. Este conjunto de *hardware* é integrado e, associado a um *software* específico, permite a operação do robô para as mais variadas tarefas.



Figura 1.2 – Estrutura mecânica do ED-7255.

A Figura 1.3 mostra a controladora original do modelo educacional em estudo.



Figura 1.3 – Controladora original do modelo educacional.

De fato a mecânica do manipulador possui folgas e imprecisões nas juntas, o que certamente é um problema e afeta seu desempenho. Ademais, a controladora causava e/ou permitia erros de posicionamento além de impulsos e reações espúrias no *hardware*.

Espera-se que as deficiências mecânicas, assim como os problemas de precisão e estabilidade de posicionamento possam ser atenuados com o sistema proposto e uma boa solução de controle. Ademais, outros aspectos serão melhorados ou implementados, como a conectividade e disponibilidade de recursos, incluindo a visualização de parâmetros e curvas, além da possibilidade de alterar as dinâmicas de controle para fins didáticos, por exemplo.

As Tabelas 1.1 e 1.1 mostram algumas especificações técnicas e informações dos eixos do modelo didático.

Tabela 1.1 – Informações técnicas do manipulador.

Construção:	Braço vertical articulado
Número de juntas:	5 juntas de revolução + garra
Carga útil (<i>payload</i>):	1 kg
Comprimento máximo do robô:	802 mm
Velocidade de movimentação máxima:	750 mm/s
Abertura da garra:	80 mm
Precisão:	$\pm 1^\circ$
Tipo de sensor de posição:	<i>Encoder</i> absoluto
Posição <i>HOME</i>:	Baseada em <i>encoder</i> absoluto
Atuadores:	Motores CC 24 V
Massa total:	9,5 kg
Temperatura de operação:	2°C - 40°C

Tabela 1.2 – Especificação dos *links* do robô.

Eixo	Faixa de Operação	Comprimento [mm]	Massa [kg]
Nº 0 (Base)	0°	80	5,9
Nº 1	$\pm 170^\circ$	107	3,4
Nº 2	+30° / - 90°	230	3,3
Nº 3	0° / - 135°	230	1,9
Nº 4	$\pm 90^\circ$	0	0,6
Nº 5	$\pm 170^\circ$	0	0,05
Nº 6 (Garra)	0 mm – 80 mm	139	0,35

As Figuras 1.4 e 1.5 mostram as vistas do espaço de trabalho do manipulador, e o desenho técnico do manipulador em vistas frontal e lateral, respectivamente.

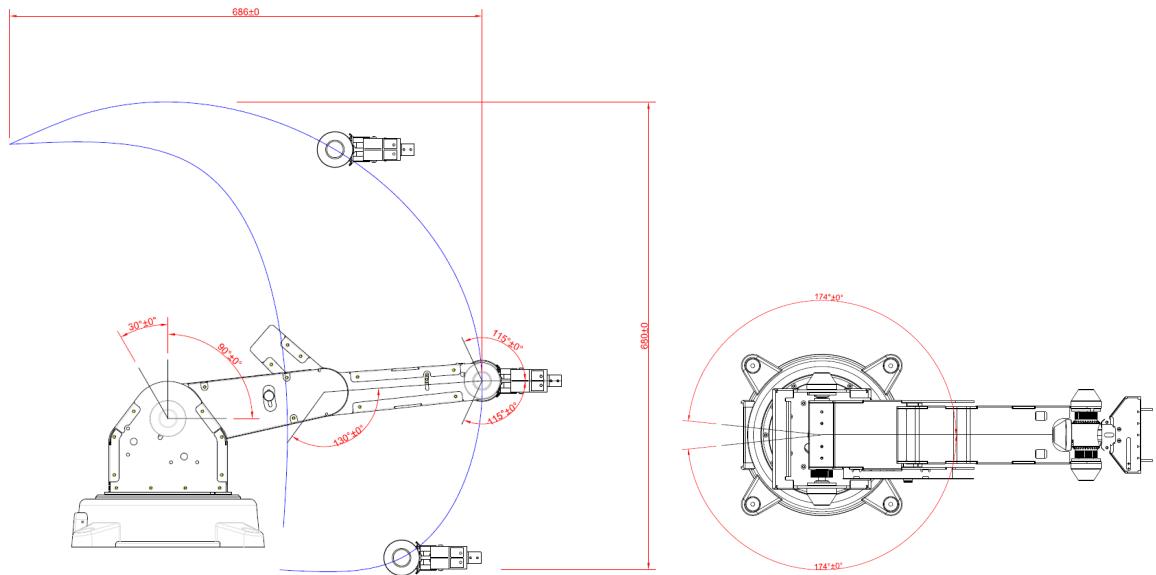


Figura 1.4 – Espaço de trabalho do manipulador.

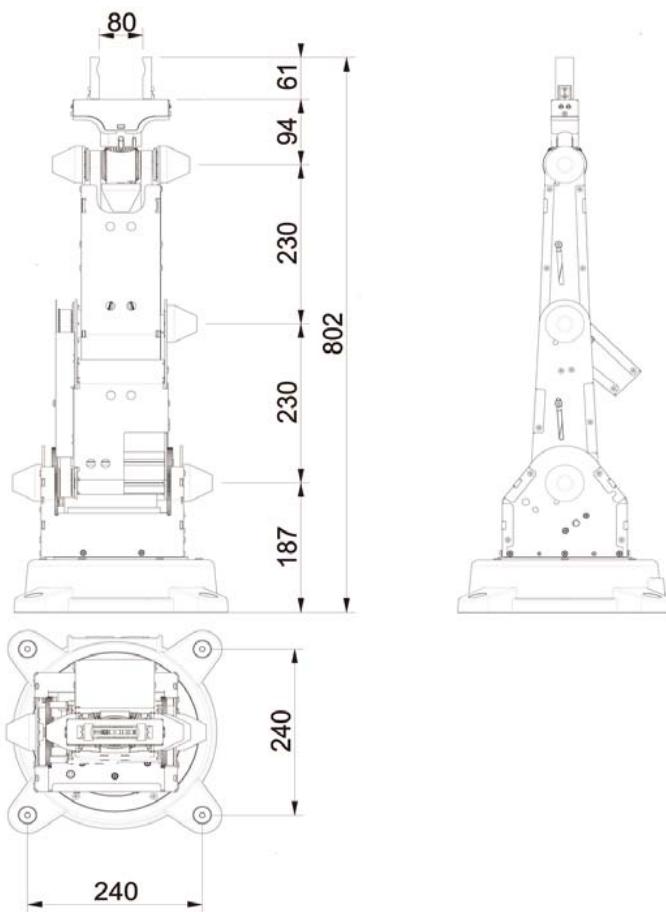


Figura 1.5 – Desenho técnico mecânico do manipulador.

A leitura de posição das juntas é feita por meio de *encoders* magnéticos absolutos, como o mostrado na Figura 1.6. Diferentemente dos *encoders* de quadratura incrementais, sua saída pode ser um sinal analógico ou um *PWM* (*Pulse Width Modulation*) cujos valores médios são associados linearmente aos ângulos mensurados.



Figura 1.6 – *Encoder* magnético absoluto MA3 (US DIGITAL, 2017).

O dispositivo de instrumentação da empresa norte-americana *US Digital*, de modelo MA3 presente no modelo didático é alimentado com uma tensão de 5 V_{cc} e saída *PWM*, com frequência de 1 kHz e resolução de 10 bits . Essas características garantem uma leitura de 1024 posições angulares distintas por revolução e o componente tem uma taxa de atualização de 1 kHz (*sampling rate*), possibilitando que a cada 1 ms seja possível realizar uma nova aquisição de informação. A Figura 1.7 esboça o comportamento da tensão média de saída do *encoder* em função do ângulo do eixo.

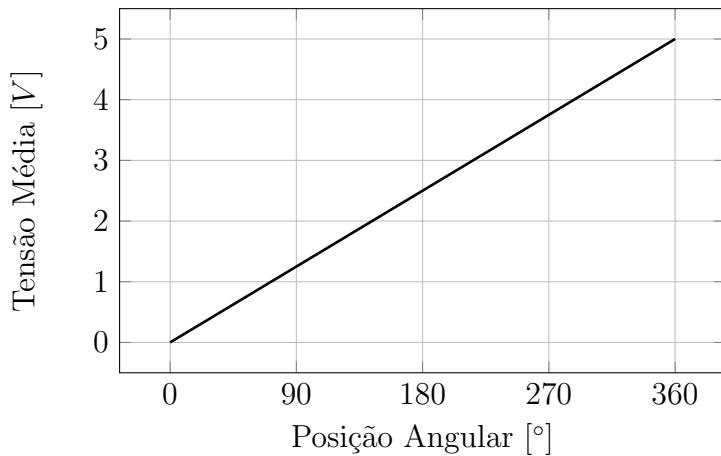


Figura 1.7 – Tensão média de saída do encoder em função do ângulo mensurado.

1.4 Contribuições e Publicações

Foi desenvolvido paralelamente uma plataforma didática *IoT* para ensino experimental de sistemas de controle (ALVES et al., 2024). O sistema proposto é baseado em *hardware* de baixo custo, sendo versátil e baseado em ESP-32. Ademais, possui uma *IHM* (*Interface Homem-Máquina*) dinâmica e executável em qualquer navegador *web* moderno. A comunicação é feita por *Wi-Fi*, via protocolo *MQTT*, o que possibilita altas taxas de amostragem, integridade dos pacotes de dados e versatilidade de aplicações. A partir do projeto, a integração desses recursos à controladora aqui proposta é fundamental, visando um uso interativo e dinâmico do modelo educacional por parte dos discentes.

1.5 Organização

O presente documento é dividido em cinco capítulos:

- Este capítulo apresenta o problema geral abordado neste trabalho, seus principais objetivos, um resumo de suas principais contribuições e um retrospecto e perspectiva de publicações relacionadas e produzidas no período.
- O segundo capítulo faz uma revisão dos conceitos e técnicas necessários para prosseguir com o desenvolvimento das abordagens necessárias ao trabalho proposto. Isso inclui as noções de cinemática de manipuladores, modelagem de sistemas, eletrônica digital, analógica e de potência e controle de sistemas robóticos.
- O terceiro capítulo apresenta os projetos e desenvolvimentos metodológicos realizados ao longo do trabalho, de forma a detalhar os processos utilizados e registrar as etapas teóricas e práticas empregadas na manutenção, projeto e desenvolvimento de *hardware* e *software* do sistema proposto.
- O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e conduz uma discussão qualitativa e quantitativa sobre os mesmos, a fim de apurar as contribuições do trabalho por meio da constatação do desempenho e recursos obtidos, além da comparação com o funcionamento original.
- O último capítulo conclui o trabalho, resumindo suas contribuições e sugerindo novas perspectivas de pesquisas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são revisados conceitos e técnicas comumente usados nas grandes áreas da robótica e eletrônica, bem como aqueles estudados e que foram aplicados ao projeto e desenvolvimento da controladora proposta para o manipulador ED-7255, baseada em sistema microcontrolado e de baixo custo.

2.1 Caracterização da Área

Os sistemas robóticos geralmente são complexos e abrangem diversas áreas do conhecimento das engenharias, como a mecânica, a eletrônica, o controle e a programação. Dessa forma, faz-se necessário um estudo amplo dos conceitos usuais da área, considerando-se ainda que, em sua generalidade, os sistemas robóticos são compostos pelos componentes introduzidos na Figura 2.1 (SICILIANO et al., 2009).

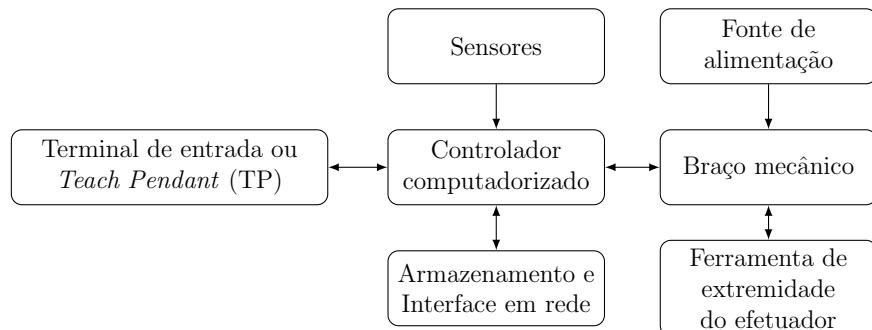


Figura 2.1 – Diagrama geral de um sistema robótico.

Os terminais de comando ou *TP (Teach Pendant)* são dispositivos compostos geralmente por um *display*, *joystick*, botões e indicadores. Este conjunto de componentes, geralmente coordenados por um sistema operacional baseado em *Linux*, atuam como entradas e saídas, permitindo a interface dos comandos e informações entre o usuário e a controladora do robô.

O computador faz o papel de unidade central de processamento, sendo responsável por gerenciar os demais módulos e periféricos do sistema, além de realizar os cálculos necessários ao funcionamento do robô, como cálculos de cinemática, trajetória e controle do manipulador.

O módulo de programa, armazenamento e rede geralmente engloba um servidor que pode ser local ou remoto, permitindo uma ampliação na comunicação, conectividade

e interação via rede, viabilizando recursos de integração em ambientes mais complexos e em série, como a teleoperação em uma linha de produção, por exemplo.

A ferramenta da extremidade do efetuador pode ser variada, como garras, tochas de solda, eletroímãs, entre outras. A funcionalidade, força motriz e aplicação das mesmas depende da tarefa a ser executada.

Alguns sistemas robóticos podem envolver medição de corrente e força, entretanto não são onipresentes. Os sensores de posição, por sua vez, fazem parte de qualquer manipulador, uma vez que, o controle da posição final do efetuador é imprescindível para a finalidade desses robôs.

A instrumentação usual para as juntas de um manipulador pode envolver a utilização de potenciômetros ou, em sua maioria, os dispositivos chamados *encoders* para leituras de posição e estimativas de velocidade e aceleração articulares. Estes componentes podem funcionar com diferentes princípios, como os mecânicos, ópticos ou magnéticos; podendo ainda ser do tipo relativo (incremental de quadratura) ou do tipo absoluto.

O braço mecânico envolve a base, os *links*, as juntas (reduções e acoplamentos) e as estruturas mecânicas que sustentam os sensores e atuadores, formando a cadeia cinemática que leva à extremidade do efetuador, resultando na flange (peça final do manipulador em que acoplam-se as ferramentas).

Os motores responsáveis por atuar as juntas de um robô podem ser pneumáticos, hidráulicos ou elétricos. Apesar de os dois primeiros terem maior capacidade de fornecer torque, os motores elétricos são mais empregados na robótica devido à praticidade, menor custo de implementação, melhor precisão no controle de posição e simplicidade de manutenção (SICILIANO et al., 2009).

O conjunto formado pelo motor, acoplamento (engrenagens e redução), *link* e sensor(es) formam o atuador de uma junta do manipulador, compondo ou sendo composto por um servomecanismo, que é responsável pelo controle de posição daquele grau de liberdade em específico.

Diversos tipos de motores elétricos são utilizados na robótica, como os motores de corrente contínua ou alternada; de ímã permanente com escovas ou *brushless*; monofásicos, bifásicos ou trifásicos, entre outras características eletromecânicas.

Um detalhe importante no controle de posição angular refere-se à realimentação dos servomecanismos, uma vez que a malha fechada garante a regulação e, para tanto, um bom *feedback* pode ser determinante na acurácia, precisão e robustez do controle desejado. A instrumentação realizada diretamente sobre o *link* pode ser melhor do que o sensoriamento no eixo do motor, uma vez que fatores como folgas e não linearidades nos acoplamentos e reduções podem afetar a movimentação da junta. Assim, os diversos

tipos de atuação nas juntas podem ser analisados e empregados nos robôs de acordo com os critérios mencionados acima, incluindo aspectos econômicos e viabilidade técnica e operacional (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

Os motores de corrente contínua com ímã permanente, conhecidos industrialmente como máquinas CC de campo invariável são simples e versáteis, uma vez que suas aplicações são amplas e requerem apenas o controle da tensão e/ou corrente de armadura para funcionamento. O ímã fixo no estator gera o fluxo magnético de campo constante e o enrolamento do rotor é excitado por um comutador com escovas que, mecanicamente causa a variação no fluxo magnético que se opõe ao campo e gera o torque necessário (CHAPMAN, 2013). A vantagem desse tipo de motor é a liberdade e variedade de aplicações que ele oferece, podendo ser submetido a chaveamentos de tensão, uma vez que a sua inércia filtra a tensão aplicada, facilitando o controle de velocidade, torque e posição, a partir de um barramento CC, por exemplo.

O motor *BrushLess-DC (BLDC)* possui ímã permanente no rotor e bobinas comutáveis no estator. Esta disposição invertida em relação ao motor CC comum faz com que o rotor tenha menos atrito por não possuir escovas e comutador mecânico. O controle deste motor é mais complexo, porém é geralmente realizado por chaveamento eletrônico das fases das bobinas, gerando o campo girante que atua sobre o eixo do motor (KIRTLEY, 2003). Apesar de apresentar menos perdas (maior eficiência na conversão eletromecânica), o fato do ímã permanente ser fixo ao rotor causa um aumento no momento de inércia do motor, o que pode ser um aspecto não desejável para um sistema robótico, devido às acelerações submetidas e os consequentes picos de torque e corrente.

Os motores trifásicos de corrente alternada, também chamados de máquinas CA classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas diretamente na parte estacionária do motor através de contatos rotativos. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014). Esses tipos de motores trazem vantagens como maior controlabilidade, durabilidade, eficiência e capacidade de fornecer torque, sendo muito aplicados em ambientes industriais em geral.

Os servomotores encapsulam um servomecanismo interno, podendo possuir transdutores dos tipos citados acima, com o adicional de incluir um sistema de *feedback* que garanta o controle de posição dedicado, no próprio motor. Estes tipos de motores, sendo de pequeno porte, geralmente são mais compactos e aplicados em pequenos sistemas, com movimentação corriqueiramente limitada a 180 ou 360 graus (controle de posição articular, especificamente).

Não são incomuns também os motores de passo. Esses atuadores são controlados por sequências de excitação adequadas e seu princípio de funcionamento não requer medição da posição angular do eixo do motor, ou seja, operam em malha aberta. O comportamento dinâmico dos motores de passo é muito influenciado pela carga útil. Além disso, eles induzem vibração da estrutura mecânica do manipulador. Tais inconvenientes limitam o uso de motores de passo ao campo dos micromanipuladores, para os quais a implementação de baixo custo prevalece sobre a necessidade de alto desempenho dinâmico (SICILIANO et al., 2009).

Outro componente importante no sistema robótico é o módulo de potência, que é responsável por acionar efetivamente os motores elétricos, atuando basicamente como amplificadores e garantindo que o sinal de controle de baixa potência seja espelhado e entregue à carga (atuador) de maior potência.

O controle de potência em uma carga geralmente é feito por meio de chaveamento, seja corrente alternada ou contínua. O primeiro estágio geralmente trata-se da retificação, conversão e estabilização de tensão, gerando um barramento CC. Posteriormente, esta tensão contínua é modulada nos terminais de acordo com a estratégia adotada para o controle da posição do motor (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2000).

O tipo de alimentação depende do motor a ser utilizado, porém arranjos comuns para a preparação do barramento CC podem envolver conversores *buck*, *flyback* ou até mesmo retificadores comuns. Para a segunda etapa de controle, podem ser empregados arranjos de transistores ou *mosfets* em meia ponte, como em inversores de frequência ou em *drivers de ponte H* para motores CC. Há ainda a possibilidade de utilizar retificadores a tiristor controlados, dispensando até mesmo a presença de um barramento CC (AHMED, 2000).

A fim de investigar e comparar métodos e técnicas utilizadas industrialmente, foi realizado um estudo acerca do sistema *C5G*, controladora do manipulador *Smart5-SiX* da Comau, presente no laboratório de robótica do CEFET-MG campus Divinópolis. A Figura 2.2 mostra os módulos e conexões da controladora.

Percebe-se que os componentes essenciais citados acima se fazem presentes, como um computador central de processamento (APC), fontes de alimentação (PPS), *drivers* inversores de potência (IAM) e ainda um módulo de segurança e distribuição (SDM). Ademais, existem plataformas e protocolos de comunicação *Ethernet*, e conectores para interface com o TP (X124), motores (X60) e *encoders* (X10).

A empresa austriaca de tecnologia, automação e controle de processos *B&R* é responsável pela produção de módulos de automação industrial, fornecendo tecnologias para fabricantes como o grupo *ABB* e a própria *Comau Robotics*. Dessa forma, as controladoras industriais utilizam de protocolos e padrões industriais que garantem a modularidade

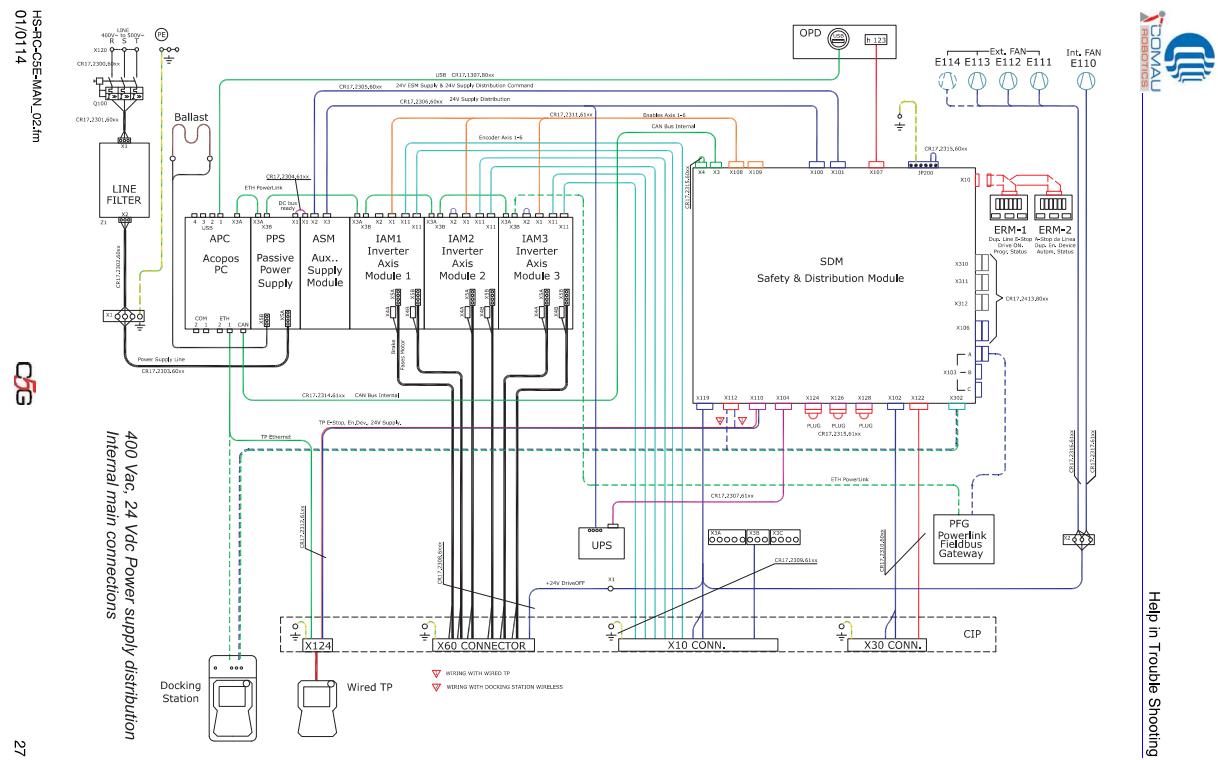


Figura 2.2 – Diagrama esquemático da controladora industrial C5G (COMAU ROBOTICS, 2014).

e compatibilidade dos mais diversos equipamentos necessários para o fornecimento dos recursos desejados.

Os computadores industriais para unidade central de processamento (APC - *Acopos Personal Computer*), drivers inversores *ACOPOSmulti*; e até mesmo periféricos auxiliares, como os cartões de entradas e saídas digitais e analógicas, e computadores industriais auxiliares como o *Linux Personal Computer (LPC)*, também utilizado pela controladora C5G Open, são exemplos de equipamentos modulares fornecidos pela *B&R* para as controladoras industriais.

No que diz respeito a padrões e protocolos, adota-se o nível lógico industrial de 24 V, muito usado também em CLP's (Controlador Lógico Programável). Ademais, a comunicação entre os módulos da *B&R* é feita por meio do protocolo *Powerlink*, conhecido como protocolo em tempo real para *Ethernet* padrão. Em contraste com o protocolo convencional, há a transferência garantida de dados críticos; sincronização de tempo de todos os nós da rede com precisão muito alta e garantia de tempos de ciclo, *jitter*, *ping* e *latência* extremamente baixos, da ordem de microsegundos.

O manipulador *Smart5-SiX* dispõe de servomotores trifásicos com *encoders* absolutos de precisão, controlados pelos drivers inversores de frequência trifásicos com circuito básico conforme mostrado na Figura 2.3.

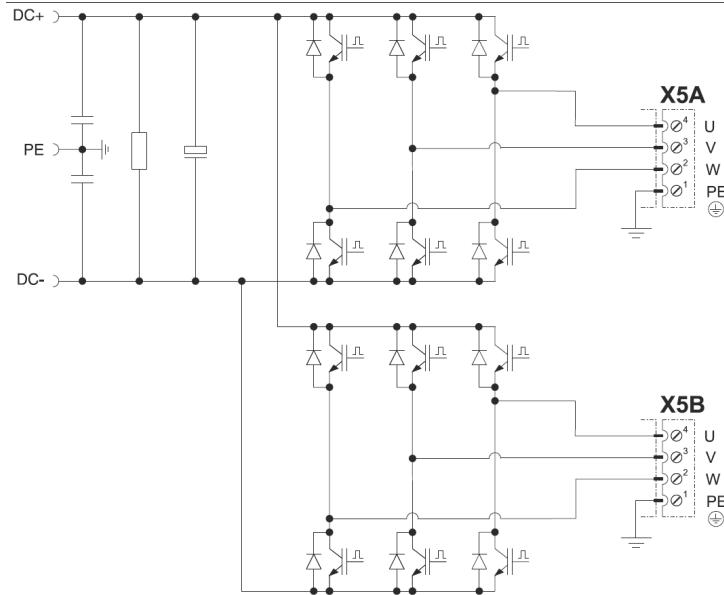


Figura 2.3 – Circuito do inversor trifásico utilizado nos módulos *ACOPOSmulti* (B&R, 2024).

Trata-se de um inversor trifásico que utiliza de arranjos em meia ponte chaveados para o controle da potência entregue aos motores. Há um barramento CC gerado a partir da retificação da tensão da rede que, após estabilização e filtragem, alimenta dois inversores, responsáveis pelo acionamento de dois motores do robô.

Dependendo do porte do manipulador, a estrutura de acionamento e potência será diferente, ao passo que plantas reduzidas e modelos didáticos, geralmente operam com tensão reduzida e corrente contínua.

No que tange a esfera do controle, as lógicas e estratégias industriais, assim como os modelos dos manipuladores são fechados e não se tem acesso à essas informações. Contudo, é comum a utilização de estratégias como o controle independente por junta, que simplifica um sistema *Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)* em diversos sistemas *Single-Input-Single-Output (SISO)* e técnicas como *feedforward* (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

Os controladores para sistemas robóticos geralmente adotam uma topologia PID por junta, sendo que este, deve ser estável para entradas de referência em aceleração e com amortecimento crítico, visando atingir a posição final desejada com acurácia, velocidade e sem *overshoot* (NISE, 2013).

2.2 Fundamentação Teórica

Nesta seção são discutidos os fundamentos e conceitos que embasam os desenvolvimentos necessários a serem empregados posteriormente.

2.2.1 Cinemática de Manipuladores

Os manipuladores robóticos tratam-se de cadeias cinemáticas abertas e complexas. A variação de suas juntas geram configurações articulares particulares que possibilitam alcançar determinada posição e orientação com seu efetuador, que pode ser uma ferramenta acoplada à sua extremidade, por exemplo. Assim, é fundamental a obtenção de relações matemáticas que descrevam a cinemática de sua movimentação, a fim de posicionar os *links* em uma configuração desejada para a realização de determinada tarefa, a partir da correlação entre espaço de juntas (articular) e cartesiano (SICILIANO et al., 2009).

2.2.1.1 Cinemática Direta

A obtenção do Modelo Cinemático Direto (MCD) de um manipulador visa encontrar a matriz homogênea que expressa a transformação do *frame* da base (referencial) para o *frame* da extremidade do efetuador, em função dos ângulos das juntas, ou seja, dado uma configuração articular (espaço de juntas), obter a posição e orientação final do efetuador, no espaço cartesiano.

Para a obtenção do modelo cinemático, adota-se o padrão de *Denavit-Hartenberg*, atribuindo-se *frames* à base (referência) e a cada uma das juntas, montando a tabela de D-H e as matrizes A_i conforme (2.1).

$$\begin{aligned}
 A_i &= \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Por fim, o modelo cinemático completo do manipulador será dado por:

$$H_n^0 = \prod_{i=1}^n A_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2.2}$$

em que n é o número de juntas; os elementos r_{ij} representam a submatriz de rotação, responsável pela orientação do efetuador em relação à base; e o vetor o representa a posição relativa da extremidade do efetuador em relação a cada um dos eixos da base.

2.2.1.2 Cinemática Inversa

Em oposição à cinemática direta, dadas a posição e orientação final desejadas, a cinemática inversa visa obter as soluções possíveis para os ângulos das juntas que permitam ao manipulador alcançar a configuração final.

O ponto de partida para a solução da cinemática inversa é a matriz homogênea que descreve o alvo a ser alcançado pelo efetuador:

$$H_T = \begin{bmatrix} R & o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$= \begin{bmatrix} c_a c_e c_r - s_a s_r & -c_a c_e s_r - s_a c_r & c_a s_e & o_x \\ s_a c_e c_r + c_a s_r & -s_a c_e s_r + c_a c_r & s_a s_e & o_y \\ -s_e c_r & s_e s_r & c_e & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

em que a matriz R e o vetor o expressam a pose (posição e orientação) a ser alcançada e o conjunto (a, e, r) representam os ângulos de Euler.

A notação da orientação de um manipulador pode ser expressa nos mais variados termos, como o R, P, Y (*Roll, Pitch, Yaw*); X, Y, Z ou A, E, R , por exemplo. O modelo mais usual na robótica e que será adotado, trata-se dos ângulos de Euler (a, e, r) , que representam a orientação em rotações ZYZ no *frame* corrente, a partir da base: $R = R_{Z,a} \cdot R_{Y,e} \cdot R_{Z,r}$.

Quanto maior o número de graus de liberdade do manipulador, mais complexa será a solução da cinemática inversa, que não possui uma fórmula exata como a cinemática direta. Todavia, para os manipuladores com punhos esféricos, uma técnica utilizada para a simplificação do problema é o desacoplamento cinemático. Desde que o manipulador possua punho esférico, é possível desacoplar as cinemáticas inversas de posição e orientação, usando o centro do punho como referência (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

As equações para o desacoplamento são:

$$\begin{aligned} o_c^0 &= o - dR \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} o_x - dr_{13} \\ o_y - dr_{23} \\ o_z - dr_{33} \end{bmatrix} , \end{aligned} \quad (2.4)$$

em que o_c^0 é o vetor de posição do centro do punho, em relação à base; o é o vetor de posição que deseja-se alcançar, em relação à base; d é o comprimento do último *link* do punho, que será desacoplado; e R é a matriz de rotação que representa a orientação que deseja-se alcançar, também em relação à base.

Após o desacoplamento, a solução da cinemática inversa de posição envolve o equacionamento dos três primeiros ângulos (responsáveis pela posição) que podem ser calculados pelo método analítico, a partir das matrizes e solução de sistemas (alto grau de complexidade) ou pelo método geométrico, que geralmente é mais adotado (SICILIANO et al., 2009).

Após o cálculo dos três primeiros graus de liberdade, responsáveis pela posição, pode-se descrever a orientação no centro do punho como sendo R_3^0 . Dessa forma, a solução cinemática completa engloba ainda o cálculo dos ângulos do punho para corrigir a orientação final do orientador, a partir de uma matriz R_n^3 tal que:

$$R_n^3 = (R_3^0)^\top R , \quad (2.5)$$

em que n é o número de juntas do manipulador.

Assim, R_n^3 deve ser correlacionada com a matriz de rotação do punho do manipulador, a fim de obter um sistema de igualdades que possa gerar soluções para a orientação final do efetuador.

2.2.1.3 Cinemática Diferencial

Devido à complexidade dos movimentos de um manipulador, a correlação entre variáveis no espaço de juntas e o espaço cartesiano não é trivial, como visto nos itens acima. Em se tratando da cinemática diferencial, uma ferramenta muito valiosa para a correlação das velocidades, é a matriz jacobiana. Essa matriz é tal que:

$$\xi = J(q)\dot{q} , \quad (2.6)$$

em que ξ é o vetor de velocidades lineares e angulares no espaço cartesiano, $J(q)$ é a matriz jacobiana e \dot{q} é o vetor de velocidades articulares das juntas.

Assim, os vetores e matrizes podem ser expandidos:

$$\xi = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J(q) = \begin{bmatrix} Jv(q) \\ J\omega(q) \end{bmatrix}_{6 \times n} \quad (2.7)$$

em que v é o vetor de velocidades lineares e ω é o vetor de velocidades angulares, em relação aos eixos referenciais da base; \dot{q} é o vetor de velocidades articulares; $J_v(q)$ é o Jacobiano de velocidades lineares; e $J_\omega(q)$ é o Jacobiano de velocidades angulares.

O Jacobiano de velocidades lineares será:

$$Jv = \begin{bmatrix} Jv_1 & \dots & Jv_n \end{bmatrix}_{3 \times n}$$

$$Jv_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial o_n}{\partial q_i} = z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) & (\text{Junta rotacional}) \\ z_{i-1} & (\text{Junta Prismática}) \end{array} \right\}, \quad (2.8)$$

em que o é o vetor de translação da origem do referido *frame* em relação à base e z é o vetor de projeção desse eixo sobre a base.

O Jacobiano de velocidades angulares será:

$$J\omega = \begin{bmatrix} J\omega_1 & \dots & J\omega_n \end{bmatrix}_{3 \times n}$$

$$J\omega_i = \left\{ \begin{array}{ll} z_{i-1} & (\text{Junta rotacional}) \\ 0 & (\text{Junta Prismática}) \end{array} \right\}. \quad (2.9)$$

A partir da junção de (2.8) e (2.9), obtém-se o Jacobiano completo de um manipulador, satisfazendo (2.6).

Outro operador importante é o Jacobiano inverso, que é utilizado para determinar a velocidade no espaço de juntas. Para obtenção do mesmo, inverte-se a matriz jacobiana, desde que a mesma seja invertível. Assim, faz-se necessário que essa matriz seja quadrada, ou seja, $n = 6$. Para casos em que há um número diferente de juntas, faz-se o uso da pseudo-inversa para inversão de matrizes não quadradas:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= J^{-1}\xi \\ &= J^+\xi \\ &= (J^\top J)^{-1} J^\top \xi \end{aligned} \quad (2.10)$$

em que J^{-1} é a inversa do Jacobiano e J^+ é a pseudo-inversa do Jacobiano.

2.2.2 Modelagem Dinâmica de Manipuladores

Além de descrever a cinemática da movimentação dos manipuladores, é importante obter uma modelagem que descreva a dinâmica de forma o mais fiel possível, uma vez que, a aplicação da cinemática a um controle em malha fechada pode garantir um regime permanente desejado porém, ao desconsiderar a influência das forças internas e externas à cadeia cinemática do manipulador, podem haver comportamentos indesejados durante o transitório, até a estabilização do sistema, em caso de convergência (SICILIANO et al., 2009).

Métodos usuais para a obtenção do modelo dinâmico dos manipuladores são Newton-Euler e Euler-Lagrange. O primeiro método trabalha com recursões progressivas e retrógradas nos *links*, a fim de calcular e projetar as forças e torques exercidas pelas juntas; por outro lado, o segundo método trabalha com energias potenciais e cinéticas, por meio de termos diferenciais parciais chamados lagrangianos.

Por praticidade, adota-se o método de Euler-Lagrange que, de forma simplificada, envolve as etapas:

- 1. Obtenção do Modelo Cinemático Direto do manipulador.**
- 2. Obtenção das Matrizes Jacobianas de Velocidades:** Processo similar ao descrito na seção anterior, porém deve-se adotar vetores de comprimento em relação aos CG's dos *links* para encontrar o jacobiano de velocidades lineares, em relação ao CG dos *links*:

$$Jv_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial o_{c,i}}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial o_{c,i}}{\partial q_n} \end{bmatrix}_{3 \times n}, \quad (2.11)$$

em que, a partir dos vetores o_i , substitui-se o comprimento integral do i-ésimo *link* (l_i) pela distância do início do *link* até o CG (lc_i), obtendo-se $o_{c,i}$.

Para as velocidades angulares dos *links*, em juntas rotacionais é calculada o termo corrente de velocidade angular e somado ao termo anterior, ou seja, é uma grandeza cumulativa ao longo da cadeia cinemática:

$$\omega_i = [\omega_{i-1} + z_{i-1} \dot{q}_i]_{3 \times 1}, \quad (2.12)$$

e para juntas prismáticas:

$$\omega_i = \omega_{i-1}. \quad (2.13)$$

Obtem-se, então, o jacobiano de velocidades angulares:

$$J\omega_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_i}{\partial \dot{q}_1} & \dots & \frac{\partial \omega_i}{\partial \dot{q}_n} \end{bmatrix}_{3 \times n}. \quad (2.14)$$

- 3. Cálculo da Matriz de Inércia:** Calcular a energia cinética translacional de cada *link*:

$$kt_i = \frac{1}{2}m_i [Jv_{c,i}]^T [Jv_{c,i}], \quad (2.15)$$

em que m_i é a massa do i-ésimo *link*.

Calcular a energia cinética angular de cada *link*:

$$ka_i = \frac{1}{2} [J\omega_{c,i}]^T [R_i] I_i [R_i]^T [J\omega_{c,i}] \quad , \quad (2.16)$$

em que I_i é o momento de inércia do iésimo *link*.

Assim, a matriz de inércia será, portanto, a matriz diagonal:

$$d_i = kt_i + ka_i$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & d_n \end{bmatrix} . \quad (2.17)$$

- 4. Cálculo dos Símbolos de Christoffel (Coriolis):** As interações de Coriolis serão representadas por termos de uma matriz dependente das posições e velocidades angulares $C(q, \dot{q})$. Primeiramente, a partir dos termos d da matriz de inercia, encontra-se os símbolos de Christoffel, para as interações com i, j, k variando de 1 a n , como sendo:

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right) . \quad (2.18)$$

Reduz-se o número de termos, para 2 GDL's, a partir de:

$$c_{kj} = [c_{1jk} \ c_{2jk}] [\dot{q}] = (c_{1jk}\dot{q}_1 + c_{2jk}\dot{q}_2) , \quad (2.19)$$

portanto a matriz final será:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_{111}\dot{q}_1 + c_{211}\dot{q}_2) & (c_{121}\dot{q}_1 + c_{221}\dot{q}_2) \\ (c_{112}\dot{q}_1 + c_{212}\dot{q}_2) & (c_{122}\dot{q}_1 + c_{222}\dot{q}_2) \end{bmatrix} . \quad (2.20)$$

- 5. Cálculo da Energia Potencial:** Calcula-se o termo da energia potencial gravitacional que atua em cada CG:

$$p_i = -m_i (g_0)^T o_{c,i} , \quad (2.21)$$

em que g_0 é um vetor coluna 3×1 que projeta o módulo da gravidade na origem. Ex.: $g_0 = [0 \ 0 \ -g]^\top$, para \vec{g} no sentido oposto ao eixo z_0 . A energia potencial total do sistema sobre cada *link* será:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$g_i = \frac{\partial P}{\partial q_i} , \quad (2.22)$$

portanto, a matriz que representa o efeito da gravidade torna-se:

$$G(q) = [g_1 \ \dots \ g_n]^\top . \quad (2.23)$$

6. Formulação do Modelo Dinâmico Final: Por fim, deve-se dispor o sistema no formato matricial:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_i|f_i \quad , \quad (2.24)$$

em que as expressões de torque (junta rotacional) ou força (junta prismática) podem ser obtidas para cada uma das juntas, em função do estado articular q e suas derivadas de primeira e segunda ordem (posições, velocidades e acelerações articulares, respectivamente).

2.2.3 Planejamento e Geração de Trajetória

Uma vez que são conhecidos o ponto de partida e o alvo desejado, as etapas de planejamento e geração de trajetória são fundamentais, a fim de gerar referências adequadas aos controladores, para um movimento suave e coordenado de todas as juntas.

É desejável ter controle sobre seis aspectos da movimentação do robô, sobre as condições de contorno das curvas: as posições, velocidades e acelerações iniciais e finais. Para tanto, são adotados polinômios do tipo $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ tal que $n = w - 1$, em que w é o número de restrições (pontos fixos) e n é o grau do polinômio necessário.

É usual a interpolação das trajetórias em espaço articular, sendo que a movimentação de cada junta será descrita preferencialmente por um polinômio de 5º grau, enquanto suas derivadas de primeira e segunda ordem expressam sua velocidade e aceleração, respectivamente; conforme (2.25).

$$\begin{aligned} q(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ \dot{q}(t) &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \\ \ddot{q}(t) &= 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \end{aligned} \quad (2.25)$$

A partir das condições de contorno, ou seja, posições, velocidades e acelerações iniciais e finais, nos instantes t_0 e t_f , são deduzidas algumas das constantes e formuladas as expressões:

$$\begin{aligned} q(t_0) &= q_0 \quad \therefore a_0 = q_0 \\ \dot{q}(t_0) &= \dot{q}_0 \quad \therefore a_1 = \dot{q}_0 \\ \ddot{q}(t_0) &= \ddot{q}_0 \quad \therefore a_2 = \frac{\ddot{q}_0}{2} \\ q(t_f) &= q_f \quad \therefore a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 + a_4t_f^4 + a_5t_f^5 = q_f \\ \dot{q}(t_f) &= \dot{q}_f \quad \therefore a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 + 4a_4t_f^3 + 5a_5t_f^4 = \dot{q}_f \\ \ddot{q}(t_f) &= \ddot{q}_f \quad \therefore 2a_2 + 6a_3t_f + 12a_4t_f^2 + 20a_5t_f^3 = \ddot{q}_f \end{aligned} \quad , \quad (2.26)$$

equações estas, que podem ser descritas em um sistema matricial e solucionado a fim de obter as constantes restantes:

$$\begin{bmatrix} q_f - q_0 - \dot{q}_0 t_f - \frac{\ddot{q}_0}{2} t_f^2 \\ \dot{q}_f - \dot{q}_0 - \ddot{q}_0 t_f \\ \ddot{q}_f - \ddot{q}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} .$$

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} q_f - q_0 - \dot{q}_0 t_f - \frac{\ddot{q}_0}{2} t_f^2 \\ \dot{q}_f - \dot{q}_0 - \ddot{q}_0 t_f \\ \ddot{q}_f - \ddot{q}_0 \end{bmatrix} . \quad (2.27)$$

Por fim, a trajetória de cada junta será idealmente descrita pelo polinômio:

$$q(t) = q_0 + \dot{q}_0 t + \frac{\ddot{q}_0}{2} t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 . \quad (2.28)$$

2.2.4 Filtro Passa-Baixas Analógico

O filtro passa-baixas é um sistema que atenua sinais de alta frequência, permitindo a saída, quase integral, de sinais dentro de sua banda de passagem (AGUIRRE, 2014). Sua principal aplicação é a filtragem (atenuação) de sinais espúrios, como ruídos de medição e interferências eletromagnéticas, por exemplo. Para um filtro passa-baixas de primeira ordem, a função de transferência é:

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} , \quad (2.29)$$

em que τ é a constante de tempo do sistema.

A constante de tempo determinará o tempo de acomodação do filtro, tal que $ST = 4\tau$ e também possui relação com a frequência de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} . \quad (2.30)$$

Analogicamente, um filtro de primeira ordem simples pode ser projetado a partir de um circuito RC, como o mostrado na Figura 2.4, em que $\tau = RC$.

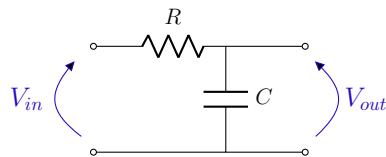


Figura 2.4 – Circuito RC que atua como filtro passa-baixas.

A fim de analisar a resposta do filtro à excitação em determinada frequência, adota-se o Diagrama de Bode do sistema, como o mostrado na Figura 2.5, que contém a resposta em frequência de um sistema equivalente a um filtro passa-baixas.

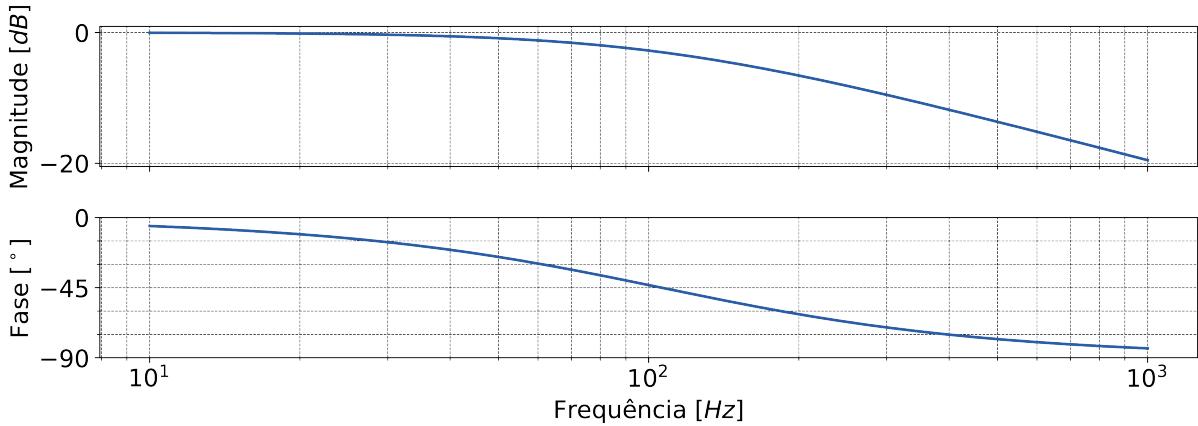


Figura 2.5 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixas de primeira ordem.

No primeiro *subplot*, tem-se a magnitude do sinal para cada frequência, em dB . Convertendo a magnitude para obter o ganho aplicado: $K = 10^{\frac{dB}{20}}$, percebe-se que o ganho em $0\ dB$ é unitário, ou seja, o sinal passa intacto. Na frequência de corte, a atenuação é de $-3\ dB$, o que equivale a um ganho de $0,707$. A banda de passagem corresponde às frequências menores que a frequência de corte e, para frequências superiores, o sinal é atenuado em $20\ dB$ a cada década.

No segundo *subplot*, é representada a fase, que indica a defasagem do sinal de saída em relação ao de entrada. Essa é uma característica importante também, pois o filtro passa-baixas naturalmente inserirá um atraso no sinal, também dependente de seu projeto (f_c) e da frequência do sinal de excitação.

Uma das aplicações dos filtros passa-baixas é a obtenção do valor médio de um *PWM*, por exemplo, o que será muito útil para este trabalho. Ao aplicar um sinal *PWM* à entrada de um filtro passa-baixas de primeira ordem, obtém-se a resposta mostrada na Figura 2.6.

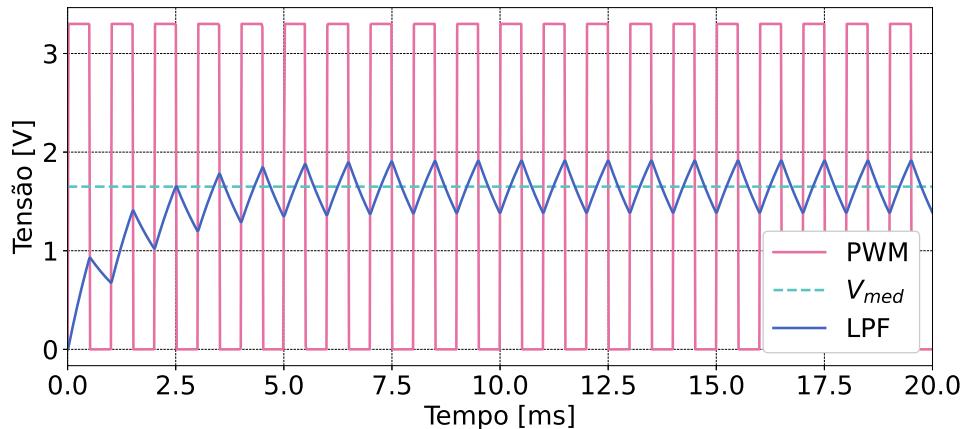


Figura 2.6 – Resposta de um filtro passa-baixas quando submetido a um sinal *PWM*.

Observa-se que, após um transitório de aproximadamente 5 ms, a saída em azul (LPF - *Low Pass Filter*) se estabiliza em um regime oscilatório, em torno da tensão média do PWM (V_{med}). As principais características de projeto desejáveis, são: tempo de acomodação e *ripple* (oscilação em torno do valor médio) reduzidos.

A Figura 2.7 mostra as curvas de tempo de acomodação e *ripple* em função da constante de tempo, a fim de encontrar um valor ótimo para projeto do filtro. As curvas foram obtidas considerando-se uma frequência de 1 kHz, comum aos sinais de PWM, e um *duty cycle* de 50%, que apresentará maior tensão de *ripple* absoluta.

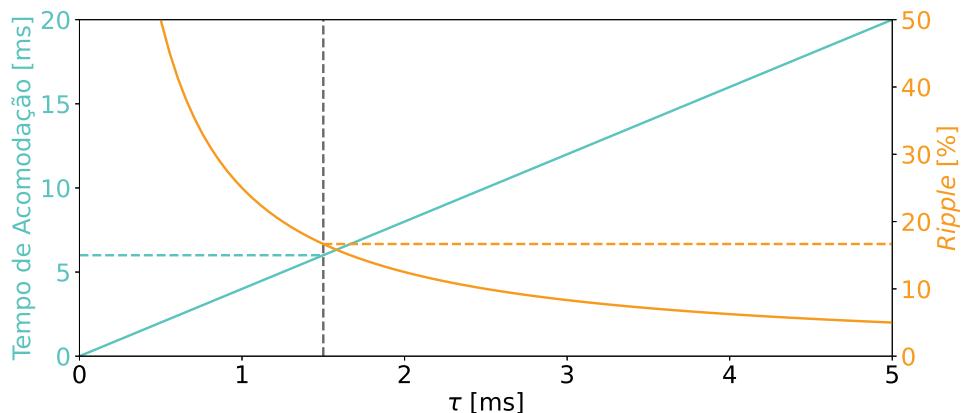


Figura 2.7 – Relação entre o tempo de acomodação, o *ripple* e a constante de tempo do filtro.

Portanto, a melhor relação desejada, para um sinal PWM de 1 kHz de frequência, se dá com $\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$. Assim, o projeto do filtro baseia-se em encontrar valores comerciais para o resistor e o capacitor, em um arranjo similar ao da Figura 2.4, em ordem de atender a relação de otimização encontrada, considerando a constante de tempo para o circuito como $\tau = RC$. Ademais, a resposta obtida pode não ser satisfatória, exigindo filtros de maior ordem, o que pode ser obtido cascanteando filtros de primeira ordem (em série) (AGUIRRE, 2014).

2.2.5 Atuadores de Corrente Contínua

Os atuadores de corrente contínua são sistemas eletromecânicos formados por um motor CC, engrenagens e um *link*, podendo ser modelados como a interação entre os sistemas elétrico e mecânico equivalentes. A fim de modelar o sistema, o circuito de armadura pode ser representado pelo circuito RL mostrado na Figura 2.8.

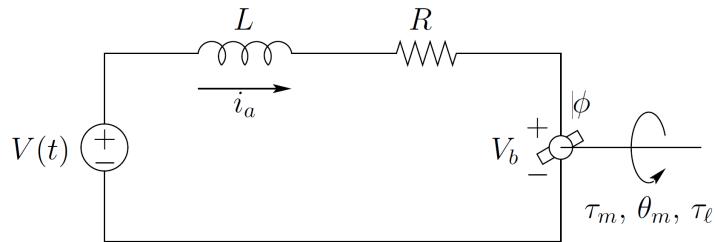


Figura 2.8 – Circuito equivalente de um motor de corrente contínua (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

Somando-se as tensões na malha, obtém-se a EDO que descreve o circuito (GARCIA, 2017):

$$\sum V = 0 \rightarrow Vt - L \frac{dI_a}{dt} - RI_a - V_b = 0 , \quad (2.31)$$

em que Vt é a tensão aplicada aos terminais do motor, L é a indutância, R é a resistência, I_a é a corrente de armadura e Vb é a força contra-eletromotriz induzida.

O atuador completo pode ser representado como na Figura 2.9.

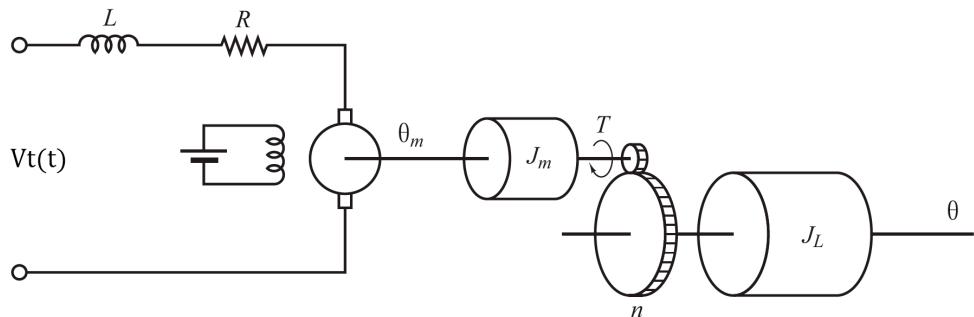


Figura 2.9 – Esquemático de um atuador CC (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005).

A EDO do sistema mecânico é descrita como o somatório dos torques, sendo os momentos de inércia e coeficientes de fricção somados, simplificando o modelo (GARCIA, 2017):

$$\sum \tau = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = \tau_m \quad (2.32)$$

em que θ é a posição angular, J é o momento de inércia total, B é o atrito viscoso total, τ_m é o torque motor..

A correlação entre os sistemas elétrico e mecânico é feita por meio das constantes k_a e ϕ , que representam um aspecto construtivo e o fluxo magnético, respectivamente. As relações entre os sistemas são estabelecidas conforme:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega = \frac{V_b}{k_a \phi} \\ \tau_m &= k_a \phi i_a \end{aligned} \quad . \quad (2.33)$$

O sistema final é então descrito pelo diagrama mostrado na Figura 2.10.

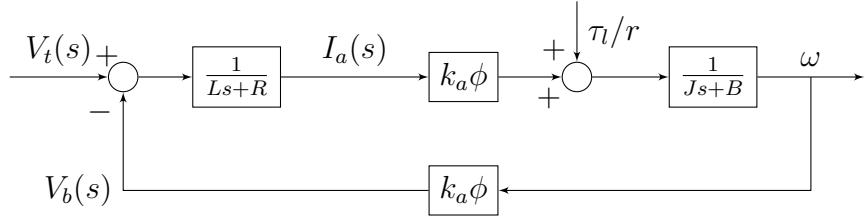


Figura 2.10 – Diagrama de blocos de um atuador de corrente contínua.

Relações mecânicas podem ser obtidas a partir de informações elétricas, substituindo (2.33) em (2.31), em regime permanente ($\frac{dI_a}{dt} = 0$):

$$Vt = R \frac{\tau_m}{k_a \phi} + \omega k_a \phi \quad . \quad (2.34)$$

Outra relação possível é a substituição de (2.33) em (2.32):

$$J\dot{\omega} + B\omega = k_a \phi I_a \quad . \quad (2.35)$$

O transitório elétrico do sistema pode ser observado com rotor bloqueado, em que a indutância se opõe à variação de corrente, gerando uma resposta de primeira ordem para uma entrada de tensão em degrau. Neste caso, a constante de tempo do sistema será equivalente à de um circuito LR simples: $\tau = \frac{L}{R}$.

Em contraste, a curva geral do sistema, observando-se o transitório de velocidade, com o motor a vazio, não corresponde exatamente ao sistema mecânico puro, uma vez que a dinâmica do indutor também é implícita. Apesar disso, a influência do sistema elétrico é mínima, praticamente desprezável em relação ao sistema mecânico, uma vez que o momento de inércia influencia relativamente mais no transitório do que a indutância (GARCIA, 2017). A partir da Equação (2.31), considerando a indutância nula, obtem-se a corrente de armadura como:

$$I_a = \frac{Vt - Vb}{R} = \frac{Vt - k_a \phi \omega}{R} \quad . \quad (2.36)$$

Por fim, ao substituir (2.36) em (2.35), resulta em:

$$J\dot{\omega} + B\omega = k_a \phi \frac{Vt - k_a \phi \omega}{R} \quad \therefore \quad g_m(t) = RJ\dot{\omega} + (RB + (k_a \phi)^2) \omega - k_a \phi Vt = 0 \quad , \quad (2.37)$$

em que $g(t)$ é a EDO que descreve o sistema simplificado.

Assim, o modelo final simplificado do sistema é dado aplicando-se a transformada de Laplace em (2.37):

$$G_m(s) = \mathcal{L}\{g_m(t)\} = \frac{k_a \phi}{RJs + RB + (k_a \phi)^2} \quad . \quad (2.38)$$

A partir do modelo simplificado, tem-se que a constante de tempo total do sistema será dada por:

$$\tau = \frac{J}{B + \frac{(k_a \phi)^2}{R}} \quad . \quad (2.39)$$

2.2.6 Controle de Potência por Chaveamento

Será realizado posteriormente.

Referências: (AHMED, 2000; MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2000)

2.2.7 *Feedforward Control*

Será avaliado para implementação posterior, mas não é objetivo principal do trabalho.

Referências: (OGATA, 2010; OGATA, 1995; DORF; BISHOP, 2001; NISE, 2013; SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005; SICILIANO et al., 2009)

2.2.8 Controlador PID

Será realizado posteriormente.

Referências: (OGATA, 2010; OGATA, 1995; DORF; BISHOP, 2001; NISE, 2013; SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2005; SICILIANO et al., 2009)

2.2.9 Comunicação MQTT

Será realizado posteriormente.

Referências: (ALVES et al., 2024)

3 Desenvolvimento

Neste capítulo são detalhados os projetos e desenvolvimentos metodológicos realizados durante a execução do trabalho, a fim de se obter os parâmetros, *hardware* e *software* essenciais ao desenvolvimento proposto.

3.1 Manutenção

O modelo didático a ser utilizado (ED-7255) foi danificado devido a mau uso e encontrava-se inoperante. A primeira junta não possui nenhum limite mecânico em sua estrutura que delimita fisicamente sua faixa de variação de posição através de batentes, bem como sua posição inicial de referência no ponto médio da faixa de variação, ficando assim, vulnerável a manipulações manuais indesejáveis. A hipótese levantada é que uma rotação, forçada manualmente, do primeiro grau de liberdade do robô possa ter causado os danos observados a componentes mecânicos e elétricos do manipulador.

Como pode ser visto na Figura 3.1, o cabeamento dos motores e *encoders* enrolou-se em torno do eixo de rotação da junta 1, causando a quebra de conectores e soldas, rompimento de fios e a fratura do acoplamento e do eixo do *encoder* magnético responsável pela leitura angular deste grau de liberdade.

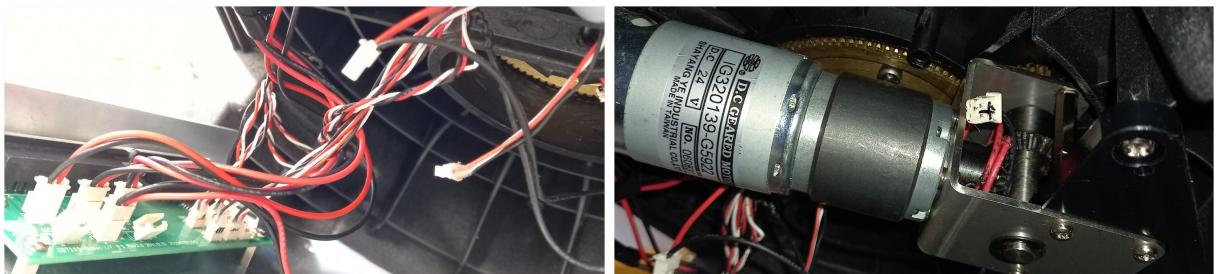


Figura 3.1 – Conectores e cabeamento da base comprometidos.

O primeiro passo da manutenção foi o reestabelecimento de todas as conexões elétricas, conectores e soldas. Posteriormente, foram realizados testes nos sensores e atuadores, a fim de verificar a integridade e funcionamento dos mesmos, principalmente dos *encoders* magnéticos, conforme pode ser visualizado na Figura 3.2.

As conexões com a controladora e o TP originais também foram revisadas, conforme mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.2 – Teste e análise dos sinais dos *encoders*.

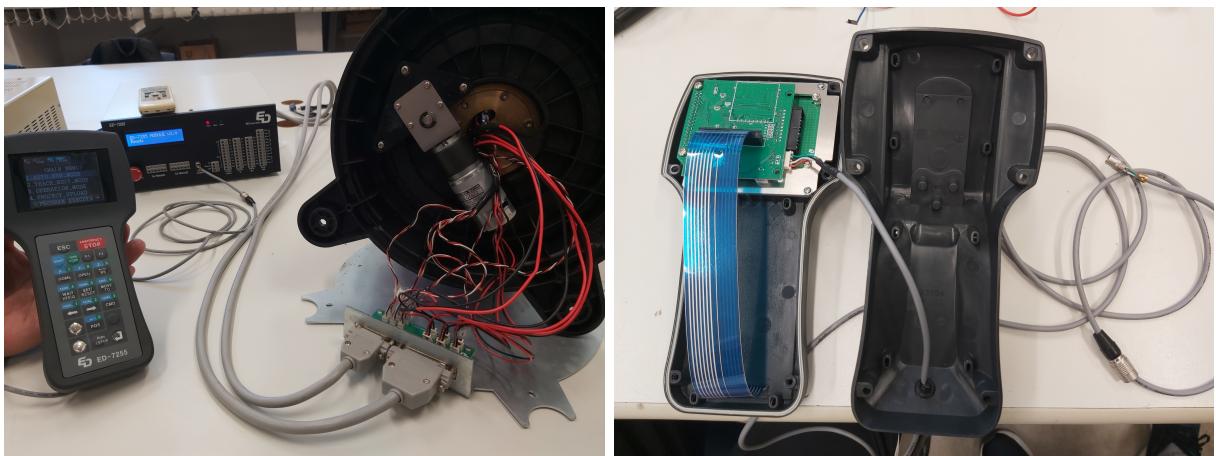


Figura 3.3 – Manutenção das conexões com a controladora e o *Teach Pendant*.

Uma vez que o robô estava desmontado e os motores foram retirados para ensaios, aproveitou-se para refazer a lubrificação das engrenagens internas das reduções planetárias dos mesmos, mostradas na Figura 3.4. Para tanto, utilizou-se graxa branca de lítio, própria para engrenagens, mancais e rolamentos.



Figura 3.4 – Processo de troca da lubrificação das reduções planetárias.

Por fim, outro grande problema tratava-se do rompimento do acoplamento e fratura do eixo do *encoder* da junta 1. A peça de acoplamento original foi despedaçada de tal forma que não foi possível reconhecer nem mesmo o formato da mesma ou como ela funcionava. O eixo do *encoder*, que já era miniaturizado ($\phi = 1/8''$) foi rompido, restando apenas 4 mm de comprimento. Após pesquisa, a compra do componente seria inviável, devido à baixa disponibilidade (mesmo internacional) e alto custo no fabricante original.

Haveriam algumas soluções alternativas a serem estudadas e discutidas.

A primeira opção seria a adoção de outro tipo de instrumentação, como *encoders* incrementais ou até mesmo um simples potenciômetro. O fato de que este trabalho propõe uma nova controladora para o modelo viabiliza esta solução, uma vez que o circuito de leitura das juntas ainda seria desenvolvido, permitindo até mesmo uma mescla de diferentes tipos de instrumentação.

Uma segunda opção seria, após constatado o funcionamento normal do *encoder*, mesmo com o eixo rompido, fabricar um acoplamento projetado para aproveitar a dimensão restante do eixo. Apesar de mais desafiadora mecanicamente, esta foi a solução adotada, em ordem de manter a originalidade da instrumentação do modelo didático, visando ainda a manutenção da compatibilidade com a controladora original.

Assim, a partir das medidas obtidas da base do robô e dimensões restantes do eixo do *encoder*, foi projetado e usinado um acoplamento em uma liga de alumínio ASTM 6351, com um furo rosulado M4 para fixação junto à base e um furo justo ao diâmetro do eixo ($\phi = 1/8"$), com um parafuso allen M3 sem cabeça para aperto do eixo. A peça acabada pode ser visualizada na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Peça usinada para acoplamento do *encoder* à junta 1.

Realizou-se então o acoplamento da junta 1 e a montagem completa do manipulador, verificando o funcionamento esperado de todos os motores e *encoders*. Assim, a manutenção do robô foi concluída e o *hardware* está apto a receber a nova controladora desenvolvida neste trabalho.

3.2 Modelagem Cinemática

O manipulador ED-7255 possui 5 graus de liberdade, fato este, que possibilita uma posição generalizada dentro de seu espaço de trabalho. Por outro lado, a orientação final do efetuador é restringida, uma vez que seu punho possui mobilidade apenas para

Pitch e *Roll*. O movimento de *Yaw*, por sua vez, será igual ao ângulo da junta 1, ou seja, é estruturado, uma vez que o cálculo desse ângulo visa atender a cinemática de posição.

A posição é definida a partir do eixo referencial da base (x,y,z) em milímetros, enquanto que a orientação é expressa em termos de ângulos de Euler (a,e,r) em um padrão ZYZ no *frame* corrente, a partir da base, ou seja: $R = R_{z,a}R_{y,e}R_{z,r}$.

3.2.1 Modelo Cinemático Direto

Para a obtenção do modelo cinemático, o primeiro passo é a representação da cadeia cinemática do manipulador por meio de um diagrama de arame, conforme mostrado na Figura 3.6.

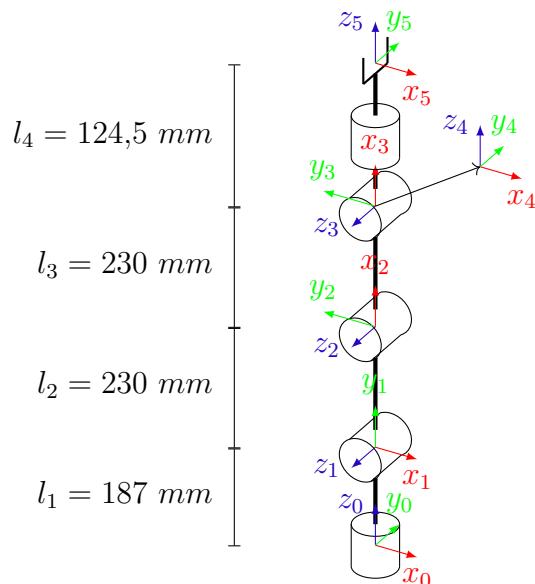


Figura 3.6 – Diagrama de arame do ED-7255.

As dimensões dos *links* estão explícitos no diagrama, enquanto que o sentido de rotação de cada junta estão associados à orientação dos eixos z , conforme especificações técnicas da Seção 1.3. A atribuição dos *frames* seguem as notações de Denavit-Hartenberg e garantem o sistema dextrogiro.

A partir dos *frames*, as informações necessárias ao modelo cinemático são dispostas na Tabela 3.1, sendo os parâmetros D-H: θ_i a rotação em torno do eixo z_{i-1} , d_i o deslocamento no eixo z_{i-1} , a_i o deslocamento no eixo x_i e α_i a rotação em torno do eixo x_i .

Tabela 3.1 – Tabela de Denavit-Hartenberg

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	l_1	0	90°
2	$\theta_2^* + 90^\circ$	0	l_2	0°
3	θ_3^*	0	l_3	0°
4	$\theta_4^* - 90^\circ$	0	0	-90°
5	θ_5^*	l_4	0	0°

* variável

De posse da tabela de Denavit-Hartenberg, são montadas as matrizes A_i , conforme (2.1):

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 187 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -s_2 & c_2 & 0 & -230s_2 \\ c_2 & -s_2 & 0 & 230c_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 230c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & 230s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ -c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_5 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 124.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Por fim, o modelo cinemático direto do manipulador ED-7255 é dado pela matriz homogênea:

$$H_5^0 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5 & -c_1 c_{234} s_5 - c_5 s_1 & -c_1 s_{234} & -c_1 (230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) \\ s_1 c_{234} c_5 - c_1 s_5 & -s_1 c_{234} s_5 + c_1 c_5 & -s_1 s_{234} & -s_1 (230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) \\ s_{234} c_5 & -s_{234} s_5 & c_{234} & 230c_2 + 230c_{23} + 124.5c_{234} + 187 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

3.2.2 Modelo Cinemático Inverso

A obtenção da configuração articular responsável por levar o efetuador a uma pose desejada é feita através da obtenção do modelo cinemático inverso do manipulador. Como ponto de partida para os cálculos, adota-se uma matriz homogênea alvo, que deseja-se alcançar:

$$H_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

A Figura 3.7 é o ponto de partida para o desacoplamento cinemático e cálculo do primeiro grau de liberdade.

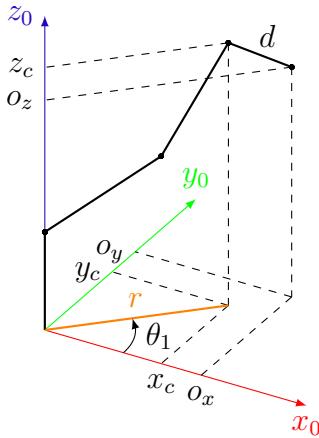


Figura 3.7 – Desacoplamento cinemático.

O comprimento d , que é o *link* do punho a ser desacoplado é $l_4 = 124,5 \text{ mm}$ nesse manipulador. Logo, as equações para desacoplamento e obtenção das coordenadas do centro do punho são:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x - 124,5r_{13} \\ o_y - 124,5r_{23} \\ o_z - 124,5r_{33} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

em que o vetor o é a posição final desejada e o vetor $[r_{13} \ r_{23} \ r_{33}]^T$ representa a orientação final do eixo z_5 , já conhecida por estar atrelada à orientação desejada para o efetuador.

Uma vez desacoplado, as cinemáticas de posição e orientação são solucionadas separadamente, considerando-se o centro do punho como ponto final para o alvo de posição.

O comprimento r e o ângulo θ_1 podem ser facilmente calculados, com base na vista da Figura 3.7. Neste tipo de manipulador, com configuração ombro-cotovelar, o primeiro grau de liberdade é diretamente relacionado às coordenadas x e y , correspondendo ao seu arco tangente.

Para fins de programação, é usual a função *Atan2* ($\Delta y, \Delta x$) como substituta para a função trigonométrica inversa convencional, por possuir alguns ajustes desejáveis, como a conversão de quadrantes e saída no intervalo $]-\pi, \pi]$. Considerando-se ainda todas as possibilidades para solução da cinemática inversa, idealmente, existe também a configuração traseira, sendo obtida apenas adicionando 180° à solução frontal. Assim, o primeiro ângulo é dado por:

$$\theta_1 = \begin{cases} \text{Atan2}(y_c, x_c) & (\text{Configuração frontal}) \\ \text{Atan2}(y_c, x_c) \pm 180^\circ & (\text{Configuração traseira}) \end{cases}. \quad (3.5)$$

Uma variável auxiliar importante trata-se da componente radial r , que representa a projeção da extremidade do efetuador (desacoplado) no plano xy , sendo calculado geometricamente por:

$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} . \quad (3.6)$$

Para o cálculo dos outros dois ângulos responsáveis pela posição, adota-se uma vista do plano de trabalho do robô, mostrado na Figura 3.8, sendo o eixo vertical z_0 (base) e o eixo radial R que acompanha a projeção r no plano xy , sendo dependente de θ_1 .

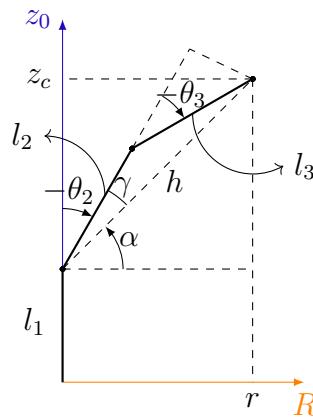


Figura 3.8 – Plano de trabalho do robô.

A primeira relação trigonométrica notável é comprimento h , obtido pelo teorema de Pitágoras:

$$h = \sqrt{r^2 + (z_c - l_1)^2} . \quad (3.7)$$

A partir da lei dos cossenos é possível obter o cosseno do ângulo θ_3 , uma vez que são conhecidos os 3 lados do triângulo: h , l_2 e l_3 ; e deseja-se obter o ângulo θ_3 , que é suplementar ao ângulo oposto ao lado h , portanto:

$$\begin{aligned} h^2 &= l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(180 - \theta_3) \\ c_3 &= \frac{h^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} . \end{aligned} \quad (3.8)$$

A solução para θ_3 então envolve c_3 , sendo o valor conhecido de seu cosseno, e o seno, obtido pelo teorema fundamental da trigonometria. O sinal do seno calculado determinará as possibilidades de configuração, uma vez que ele está diretamente relacionado ao sinal do próprio ângulo:

$$\theta_3 = \begin{cases} \text{Atan2}\left(\sqrt{1 - c_3^2}, c_3\right) & (\text{Configuração cotovelo para baixo}) \\ \text{Atan2}\left(-\sqrt{1 - c_3^2}, c_3\right) & (\text{Configuração cotovelo para cima}) \end{cases} . \quad (3.9)$$

O cálculo de θ_2 é dependente de θ_3 e define-se ângulos auxiliares, representados na Figura 3.8, para facilitar sua obtenção. O ângulo α é calculado como o arco tangente dos catetos $z_c - l_1$ e r , enquanto que o ângulo γ é calculado como o arco tangente dos catetos $l_3 \sin(\theta_3)$ e $l_2 + l_3 \cos(\theta_3)$:

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{Atan2}(z_c - l_1, r) \\ \gamma &= \text{Atan2}(|l_3 \sin(\theta_3)|, l_2 + l_3 \cos(\theta_3))\end{aligned}\quad (3.10)$$

Por fim, utiliza-se da complementaridade entre os ângulos γ , α e θ_2 para obter as soluções deste último grau de liberdade de posicionamento:

$$\theta_2 = \begin{cases} \gamma + \alpha - 90^\circ & (\text{Configuração frontal}) \\ \gamma - \alpha + 90^\circ & (\text{Configuração traseira}) \end{cases} \quad (3.11)$$

Uma vez solucionada a posição, os três primeiros ângulos são conhecidos, ou seja, a matriz de rotação que expressa a orientação até o centro do punho é numericamente conhecida e dada, pelo modelo cinemático obtido no item anterior, por:

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} -c_1 s_{23} & -c_1 c_{23} & s_1 \\ -s_1 s_{23} & -s_1 c_{23} & -c_1 \\ c_{23} & -s_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad . \quad (3.12)$$

A matriz restante, que deve corrigir a orientação é dada pelos dois graus de liberdade restante, também do modelo cinemático direto obtido:

$$R_5^3 = \begin{bmatrix} c_5 s_4 & -s_4 s_5 & c_4 \\ -c_4 c_5 & c_4 s_5 & s_4 \\ -s_5 & -c_5 & 0 \end{bmatrix} \quad . \quad (3.13)$$

A fim de obter a matriz R_5^3 , utiliza-se a orientação desejada e a relação estabelecida em (2.5):

$$\begin{aligned}R_5^3 &= \begin{bmatrix} -c_1 s_{23} & -c_1 c_{23} & s_1 \\ -s_1 s_{23} & -s_1 c_{23} & -c_1 \\ c_{23} & -s_{23} & 0 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -r_{11} c_1 s_{23} - r_{21} s_1 s_{23} + r_{31} c_{23} & -r_{12} c_1 s_{23} - r_{22} s_1 s_{23} + r_{32} c_{23} & -r_{13} c_1 s_{23} - r_{23} s_1 s_{23} + r_{33} c_{23} \\ -r_{11} c_1 c_{23} - r_{21} s_1 c_{23} - r_{31} s_{23} & -r_{12} c_1 c_{23} - r_{22} s_1 c_{23} - r_{32} s_{23} & -r_{13} c_1 c_{23} - r_{23} s_1 c_{23} - r_{33} s_{23} \\ r_{11} s_1 - r_{21} c_1 & r_{12} s_1 - r_{22} c_1 & r_{13} s_1 - r_{23} c_1 \end{bmatrix} \quad . \quad (3.14)\end{aligned}$$

Assim, podem ser descritas correlações analíticas entre elementos convenientes da matriz do MCD (3.13) e a matriz desejada (3.14).

Finalmente, têm-se expressões exatas para os senos e cossenos dos dois ângulos finais, sendo dependentes da orientação final desejada (elementos da matriz R) e dos ângulos anteriores:

$$\begin{aligned}s_4 &= -r_{13}c_1c_{23} - r_{23}s_1c_{23} - r_{33}s_1s_{23} \\c_4 &= -r_{13}c_1s_{23} - r_{23}s_1s_{23} + r_{33}c_{23} \\ \theta_4 &= \text{Atan2}(s_4, c_4)\end{aligned}\quad (3.15)$$

e

$$\begin{aligned}s_5 &= -r_{11}s_1 + r_{21}c_1 \\c_5 &= -r_{12}s_1 + r_{22}c_1 \\ \theta_5 &= \text{Atan2}(s_5, c_5)\end{aligned}\quad (3.16)$$

3.2.3 Cinemática Diferencial

A partir das formulações desenvolvidas na Seção 2.2.1.3, podem ser obtidas as matrizes Jacobianos de velocidade linear, angular e completo do manipulador ED-7255, mostrados nas Equações (3.17), (3.18) e (3.19), respectivamente.

$$J_v = \begin{bmatrix} s_1(230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) & -c_1(230c_2 + 230c_{23} + 124.5c_{234}) & -c_1(230c_{23} + 124.5c_{234}) & -124.5c_1c_{234} & 0 \\ -c_1(230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) & -s_1(230c_2 + 230c_{23} + 124.5c_{234}) & -s_1(230c_{23} + 124.5c_{234}) & -124.5s_1c_{234} & 0 \\ 0 & -230s_2 - 230s_{23} - 124.5s_{234} & -230s_{23} - 124.5s_{234} & -124.5s_{234} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$J_\omega = \begin{bmatrix} 0 & s_1 & s_1 & s_1 & -c_1s_{234} \\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1 & -s_1s_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & c_{234} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} s_1(230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) & -c_1(230c_2 + 230c_{23} + 124.5c_{234}) & -c_1(230c_{23} + 124.5c_{234}) & -124.5c_1c_{234} & 0 \\ -c_1(230s_2 + 230s_{23} + 124.5s_{234}) & -s_1(230c_2 + 230c_{23} + 124.5c_{234}) & -s_1(230c_{23} + 124.5c_{234}) & -124.5s_1c_{234} & 0 \\ 0 & -230s_2 - 230s_{23} - 124.5s_{234} & -230s_{23} - 124.5s_{234} & -124.5s_{234} & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & s_1 & -c_1s_{234} \\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1 & -s_1s_{234} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & c_{234} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

A posse do Jacobiano completo permite a correlação de velocidades lineares e angulares no espaço cartesiano, com o espaço de juntas, podendo ainda ser usada sua pseudo-inversa para o cálculo da cinemática diferencial inversa, a depender da necessidade de controle.

3.3 Modelagem Dinâmica

Uma vez conhecidos os parâmetros característicos de cada grau de liberdade da estrutura mecânica do robô, como massa, momento de inércia e fricção das juntas (atrito

viscoso), o método de Euler-Lagrange, detalhado na Seção 3.3 poderia ser aplicado para obtenção do modelo dinâmico do manipulador.

Contudo, o fabricante do kit didático ED-7255 não informa essas características, nem mesmo em sua documentação ou manual de manutenção. As únicas especificações informadas são os comprimentos dos *links*, suficiente apenas para as modelagens cinemáticas. Assim, torna-se necessário obter os demais parâmetros experimentalmente. É comum a realização de ensaios de oscilação livre para obtenção dos parâmetros de sistemas simples, como pêndulos, por exemplo. A complexidade da cadeia cinemática de um manipulador inviabiliza este tipo de ensaio e torna-o menos trivial, a medida que há interdependência entre as juntas e o movimento de uma interfere nos demais graus de liberdade.

Aspectos como a distribuição não uniforme de massa, a presença de reduções e as interações de Coriolis (influência de uma junta sobre a outra) inviabilizam e invalidam ensaios simples como oscilações livres para obtenção dos parâmetros desejados. Desta forma, ao recorrer à literatura e trabalhos na área, que são escassos uma vez que os fabricantes produzem suas peças, conhecendo rigorosamente essas características de fábrica, nota-se a utilização de excitação harmônica forçada para a modelagem dessas estruturas acopladas em cadeia.

Os ensaios serão realizados posteriormente, após montagem do *hardware* e controle dos motores.

Referências: (KOZLOWSKI; DUTKIEWICZ, 1996; KOZLOWSKI; DUTKIEWICZ, 1997; ABDELLATIF; HEIMANN, 2010; BANAS et al., 2017; SWEVERS et al., 2000; KHOSLA, 1987)

3.4 Planejamento e Geração de Trajetória

Para os manipuladores robóticos, é desejável que sua movimentação seja suave, evitando alterações bruscas na aceleração, uma vez que a manipulação de objetos, por vezes, não permite solavancos, como o caso de recipientes contendo líquidos que não se pode derramar, por exemplo. As velocidades iniciais e finais devem ser nulas, uma vez que o robô sempre partirá do repouso e, ao alcançar a posição final desejada, terminará sua movimentação com velocidade zero. A posição inicial é sempre conhecida, uma vez que a instrumentação do modelo a fornece diretamente, enquanto que a posição final trata-se do alvo articular a ser alcançado .

Dessa forma, define-se: $\dot{q}_0 = \dot{q}_f = \ddot{q}_0 = \ddot{q}_f = 0$ e, segundo formulações desenvolvi-

das na Seção 2.2.3, obtém-se as constantes necessárias para descrição da trajetória:

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_f^3 & t_f^4 & t_f^5 \\ 3t_f^2 & 4t_f^3 & 5t_f^4 \\ 6t_f & 12t_f^2 & 20t_f^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} q_f - q_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

As trajetórias das juntas então serão descritas no tempo pelo polinômio:

$$q(t) = q_0 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 , \quad (3.21)$$

em que t_f é a duração do movimento, q_0 é a posição articular inicial e q_f é a posição articular final a ser alcançada.

A movimentação proposta e também muito utilizada em manipuladores industriais, como o *Smart5-SiX* presente no laboratório de robótica do CEFET-MG, Campus Divinópolis, possui curva mostrada na linha rosa da Figura 3.9, enquanto as linhas azul e laranja esboçam a velocidade e a aceleração articular, respectivamente.

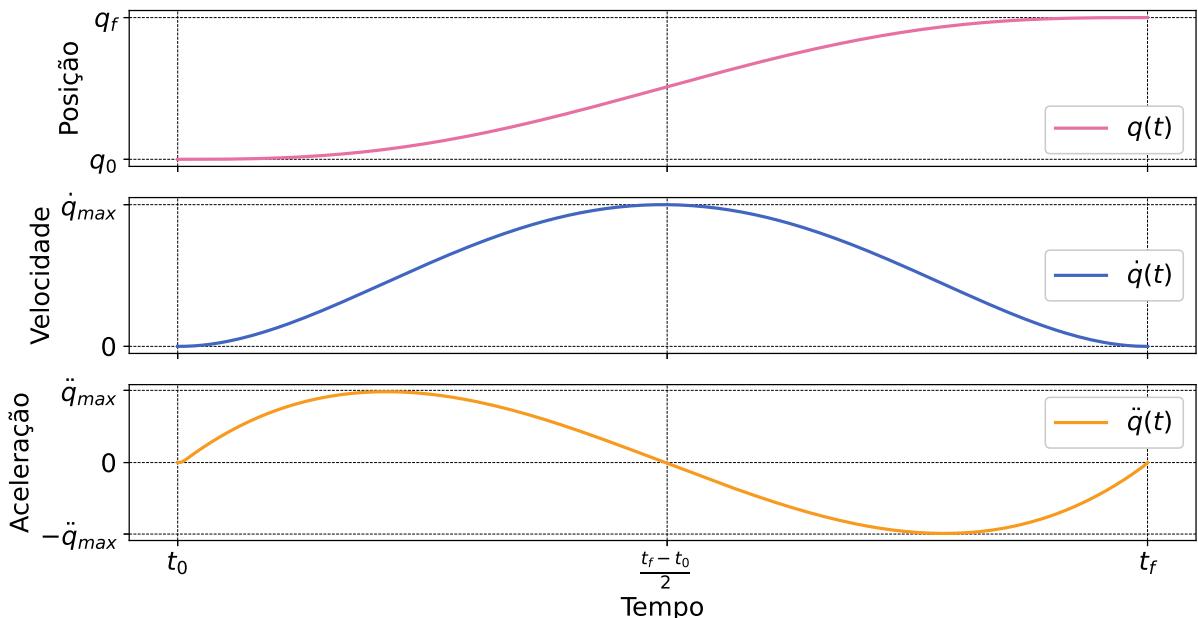


Figura 3.9 – Curvas de posição, velocidade e aceleração no espaço de juntas.

Um detalhe importante é referente ao tempo de trajetória, em que o tempo inicial é considerado nulo ($t_0 = 0$) e o valor t_f será definido em função da velocidade média de trajetória e outras constantes que serão abordadas abaixo. É fundamental garantir a sincronia entre os graus de liberdade, o chamado movimento coordenado de juntas, assegurando que, apesar de possuírem deslocamentos, velocidades e acelerações distintos, a movimentação de todas as juntas terminarão ao mesmo tempo. Para a implementação digital, no ESP-32, a trajetória será discretizada e enviada ao controlador a uma taxa constante.

Assim como acontece nos manipuladores industriais, foram definidas variáveis globais do sistema que influenciarão na geração das trajetórias, conforme relação da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Macros utilizadas para os cálculos e discretização das trajetórias.

Nome	Definição	Especificação
<i>TS_TRAJ</i>	Intervalo de interpolação da trajetória	<i>ms</i>
<i>W_MAX</i>	Velocidade angular máxima (restrição de hardware)	$^{\circ}/s$
<i>V_MAX</i>	Velocidade linear máxima (restrição de hardware)	mm/s
<i>SPD_ANG</i>	Velocidade angular (modulação por software)	%
<i>SPD_LIN</i>	Velocidade linear (modulação por software)	%
<i>SPD_OVR</i>	Velocidade geral	%

O primeiro tipo de movimentação trata-se do *Move Joint*, no qual o robô desloca-se no espaço de juntas, de acordo com as trajetórias geradas, sem se preocupar com restrições no espaço cartesiano. Ao receber uma configuração articular a ser alcançada ($q_{1_f}, q_{2_f}, q_{3_f}, q_{4_f}, q_{5_f}$), a controladora verifica se está dentro do espaço de trabalho do robô e então compara com a configuração atual ($q_{1_0}, q_{2_0}, q_{3_0}, q_{4_0}, q_{5_0}$) a fim de obter o maior deslocamento a ser realizado (Δq_{max}). Este valor, juntamente com macros definidas previamente, é utilizado para cálculo do tempo final de movimentação:

$$t_f = \frac{\Delta q_{max}}{SPD_OVR \cdot SPD_ANG \cdot W_MAX} , \quad (3.22)$$

que será utilizado para a discretização da trajetória de cada junta, descrita na Equação 3.21. A interpolação será realizada de um tempo inicial nulo, até t_f , sendo que o número de iterações será dado por $n = \frac{t_f}{TS_TRAJ \cdot 10^{-3}}$.

Outro tipo de movimentação é o *Move*, similar ao *Move Joint*, mas que recebe como parâmetros uma pose (posição e orientação) a ser alcançada. A pose (x, y, z, e, r) é transformada em uma configuração articular ($q_{1_f}, q_{2_f}, q_{3_f}, q_{4_f}, q_{5_f}$) utilizando o modelo cinemático inverso obtido na Seção 3.2.2 e então são realizados os demais procedimentos do *Move Joint*.

Por fim, existe o *Move Linear*, em que há a preocupação e custo computacional extra para manter uma trajetória linear até a pose especificada (x_f, y_f, z_f, e_f, r_f). Inicialmente, a pose a ser alcançada é comparada linearmente com a pose atual do robô (x_0, y_0, z_0, e_0, r_0), obtida pelo modelo cinemático direto extraído na Seção 3.2.1, a fim de calcular a norma do vetor de deslocamento:

$$|\vec{\delta}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} , \quad (3.23)$$

valor este, que será utilizado para cálculo do tempo final de movimentação para esse tipo de trajetória:

$$t_f = \frac{|\vec{\delta}|_{max}}{SPD_OVR \cdot SPD_LIN \cdot V_MAX} . \quad (3.24)$$

A fim de garantir a trajetória linear no espaço cartesiano, são calculados os *steps* (incrementos) em cada termo da pose, resultando em equações afim tal que:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \\ e(t) \\ r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_f - x_0}{t_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{y_f - y_0}{t_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z_f - z_0}{t_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{e_f - e_0}{t_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_f - r_0}{t_f} \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ e_0 \\ r_0 \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Assim, a cada intervalo de interpolação TS_TRAJ , é obtida uma pose, que é convertida em espaço articular com a cinemática inversa e passada como referência no controlador. Note que, a cada iteração o microcontrolador terá que, além das demais tarefas, calcular a cinemática inversa.

Um problema que pode ser observado é que essas trajetórias lineares não levam em conta as características desejáveis para um movimento suave, que foram utilizadas para cálculo das trajetórias em espaço de juntas (acelerações iniciais e finais nulas). Para solucionar essa deficiência, utilizou-se um intervalo de interpolação variável, conforme a própria trajetória articular calculada na Equação 3.21.

Dessa forma, o tempo utilizado nas Equações 3.25 não é iterado linearmente, mas sim, com base na trajetória de quinta ordem calculada para as juntas, fazendo: $t(k) = q(t)$, $q_f = t_f$ e $q_0 = 0$, em que $t(k)$ é o tempo a ser passado como argumento nas funções 3.25, cujo k varia linearmente de 0 a $n = \frac{t_f}{TS_TRAJ \cdot 10^{-3}}$ amostras. Assim, apesar de o passo de iteração que alimenta as funções afim ser variável, a taxa de interpolação geral (intervalo entre as amostras enviadas ao controlador) é constante (TS_TRAJ).

3.5 Modelagem dos Atuadores

Os parâmetros para modelagem dos motores foram obtidos experimentalmente, através de ensaios de rotor bloqueado e a vazio, a fim de avaliar as características do transitório e regime permanente do sistema eletromecânico. O modelo educacional possui 6 motores, entretanto, com portes similares: um de maior potência para as juntas de maior esforço mecânico e outro para as demais juntas; sendo assim, as modelagens serão tratadas como $M1$ e $M2$, tomando os motores das juntas 1 e 2 (sem redução) como referência.

A Figura 3.10 mostra a queda de tensão sobre um resistor *shunt*, com $R_{shunt} = 5 \Omega$, conectado em série com os motores. Com o rotor bloqueado, foi aplicado um degrau de tensão (nominal) aos terminais, a fim de observar o transitório elétrico do sistema.

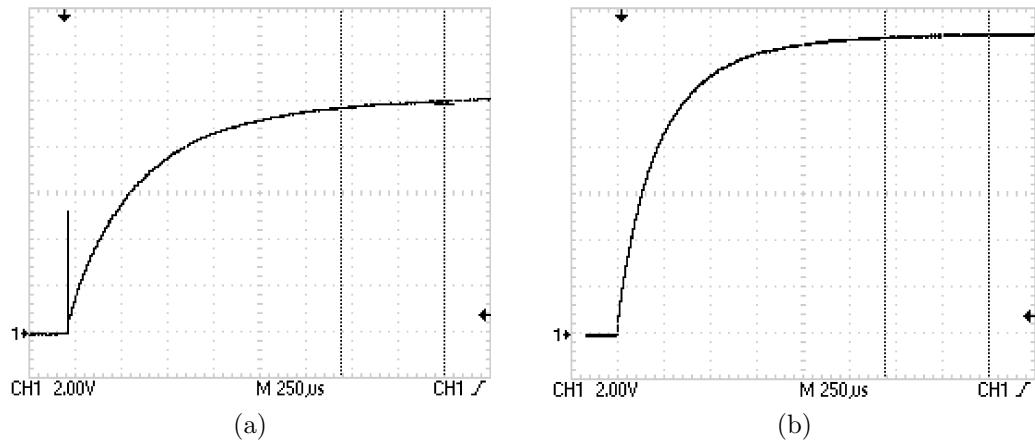


Figura 3.10 – Transitório da corrente de armadura dos motores, observado com rotor bloqueado: **a)** Para o motor 1 e **b)** Para o motor 2.

As resistências entre os terminais dos motores foram mensuradas, com o auxílio de um multímetro, como $Rt_1 = 8,3 \Omega$ e $Rt_2 = 4,1 \Omega$. Assim, a corrente fornecida aos motores, considerando a queda de tensão no resistor *shunt* é:

$$I_a(t) = V_{shunt}(t) \left(\frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{shunt}} \right) \quad . \quad (3.26)$$

As rotações, em regime permanente, dos motores a vazio, sob tensão nominal, também foram obtidas por meio de um tacômetro digital; procedimento mostrado na Figura 3.11.

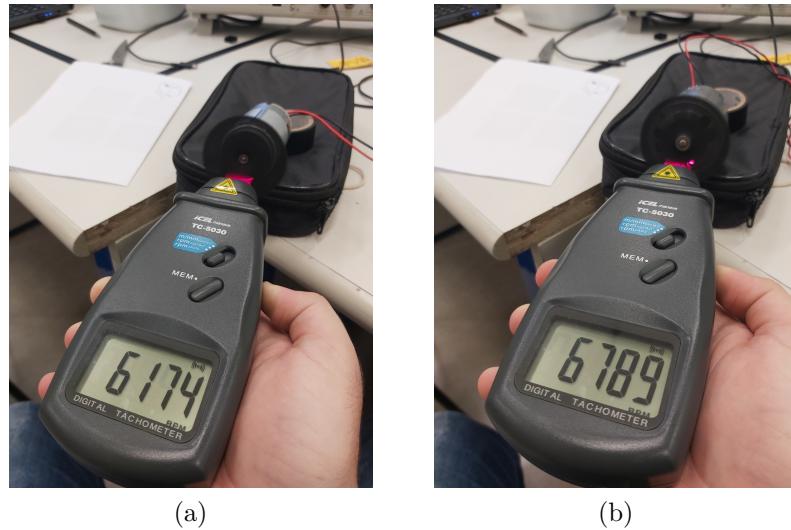


Figura 3.11 – Velocidade nominal dos motores mensurada com um tacômetro digital: **a)** Para o motor 1 e **b)** Para o motor 2.

Foram registrados na Tabela 3.3 os principais valores utilizados e obtidos nos ensaios de rotor bloqueado (*RB*) e a vazio (*VZ*) do motor 1 (*M1*) e do motor 2 (*M2*), sendo

estes: a tensão aplicada aos terminais do motor (Vt), em volts; a corrente de armadura em regime permanente (Ia_{ss}), em ampéres; o tempo de acomodação (ST), em milissegundos; e a rotação do motor (N_{ss}), em RPM.

Tabela 3.3 – Dados experimentais obtidos por meio de ensaios nos motores.

	M1		M2	
	RB	VZ	RB	VZ
Vt	24	24	24	24
Ia_{ss}	3,3	0,12	5,8	0,33
ST	1,75	75	2	100
N_{ss}	0	6174	0	6789

Considerando a tensão terminal e também a corrente em regime permanente, a resistência do motor pode ser obtida diretamente por lei de *Ohm*:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{Vt}{Ia_{ss1}} = \frac{24}{3,3} = 7,27 \Omega \\ R_2 &= \frac{Vt}{Ia_{ss2}} = \frac{24}{5,8} = 4,14 \Omega \end{aligned} \quad . \quad (3.27)$$

As indutâncias foram obtidas a partir do transitório elétrico mostrado na Figura 3.10. Assim, considerando o tempo de acomodação $ST = 4\tau$ e a constante de tempo, para um circuito LR, $\tau = \frac{L}{R}$, são calculadas as indutâncias:

$$\begin{aligned} L_1 &= \tau_1 R_1 = \frac{ST_1}{4} R_1 = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{4} 7,27 = 3,18 \text{ mH} \\ L_2 &= \tau_2 R_2 = \frac{ST_2}{4} R_2 = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4} 4,14 = 2,07 \text{ mH} \end{aligned} \quad . \quad (3.28)$$

Para o cálculo do produto $k_a \phi$ (constante construtiva e de fluxo magnético), utiliza-se (2.34), fazendo $\tau_m = 0$ (a vazio):

$$\begin{aligned} Vb_1 &= Vt - R_1 Ia_{ss1} = 24 - 7,27 \cdot 0,12 = 23,13 \text{ V} \\ k_{a1} \phi_1 &= \frac{Vb_1}{N_{ss1} \frac{2\pi}{60}} = \frac{23,13}{6174 \frac{2\pi}{60}} = 3,58 \cdot 10^{-2} \\ Vb_2 &= Vt - R_2 Ia_{ss2} = 24 - 4,14 \cdot 0,33 = 22,63 \text{ V} \\ k_{a2} \phi_2 &= \frac{Vb_2}{N_{ss2} \frac{2\pi}{60}} = \frac{22,63}{6789 \frac{2\pi}{60}} = 3,18 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \quad . \quad (3.29)$$

Considerando o regime permanente a vazio ($\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = 0$ e $\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$), calcula-se

as perdas nos motores (dissipação por ventilação, atrito viscoso, etc.):

$$\begin{aligned} B_m \omega_m = \tau_b &= k_a \phi I a \quad \therefore \quad B_m = \frac{k_a \phi I a_{ss}}{\omega_{m_{ss}}} \\ B_{m_1} &= \frac{3,58 \cdot 10^{-2} \cdot 0,12}{6174 \frac{2\pi}{60}} = 6,64 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 \\ B_{m_2} &= \frac{3,18 \cdot 10^{-2} \cdot 0,33}{6789 \frac{2\pi}{60}} = 14,76 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Os momentos de inércia foram obtidos a partir do transitório mecânico observado no ensaio a vazio. Assim, considerando o tempo de acomodação $ST = 4\tau$ e a constante de tempo deduzida em (2.39), são calculados os momentos de inércia:

$$\begin{aligned} J_{m_1} &= \frac{75 \cdot 10^{-3}}{4} \left(6,64 \cdot 10^{-6} + \frac{(3,58 \cdot 10^{-2})^2}{7,27} \right) = 3,43 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ J_{m_2} &= \frac{100 \cdot 10^{-3}}{4} \left(14,76 \cdot 10^{-6} + \frac{(3,18 \cdot 10^{-2})^2}{4,14} \right) = 6,48 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad . \quad (3.31)$$

As respostas dos modelos obtidos podem ser vistas na Figura 3.12. Como previsto na Seção 2.2.5, o comportamento da saída do sistema (**curva azul**) foi praticamente de primeira ordem, sendo desprezável o efeito da indutância, que possui dinâmica demasia-damente rápida, se comparado ao sistema mecânico.

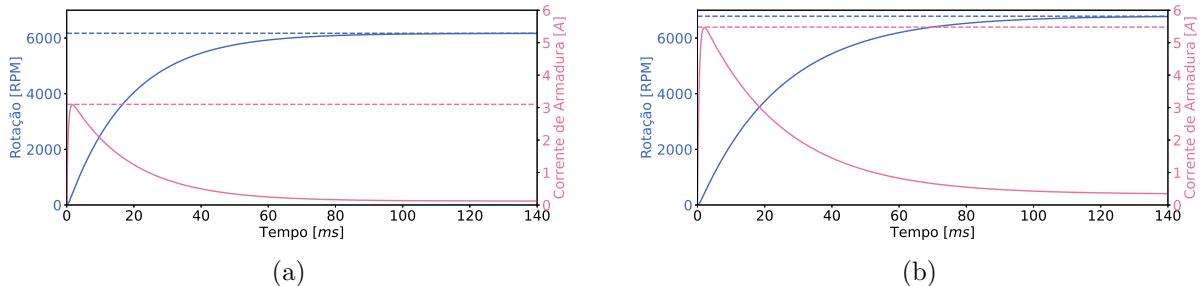


Figura 3.12 – Resposta do sistema modelado: **a)** Para o motor 1 e **b)** Para o motor 2.

Um detalhe importante é o comportamento da corrente de armadura (**curva rosa**), onde observa-se um pico de corrente instantes após a aplicação do degrau. Este comportamento se deve ao alto torque demandado na partida do motor, uma vez que o atrito estático e o momento de inércia do motor dificultam o início do movimento do rotor. Posteriormente, tanto a corrente quanto a velocidade se estabilizam nos valores de regime permanente.

3.6 Hardware

Assim como visto no segundo capítulo, toda controladora possui os módulos essenciais, seja ela de pequeno porte ou industrial, como a *C5G* da Comau. O *hardware* geral da controladora será composto pelos elementos mostrados na Figura 3.13.

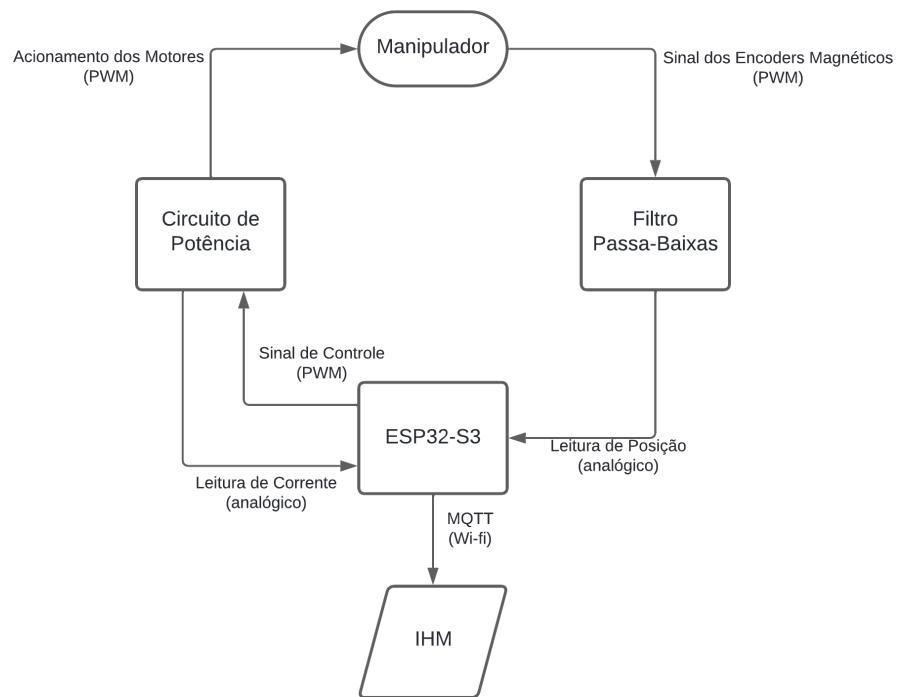


Figura 3.13 – Diagrama de módulos e sinais da controladora proposta.

Por se tratar de um projeto com muitos sensores e muitos atuadores, necessitava-se de um microcontrolador com maior poder de processamento e muitas portas para leituras analógicas, digitais e PWM. Outras características, como o *WiFi*, o baixo custo e a versatilidade de aplicações apontavam para a escolha do ESP32. Portanto, optou-se pela utilização do *ESP32-S3 DevKitC-1*, mostrado na Figura 3.14, uma vez que esta é uma das versões mais completas e poderosas em termos de recursos e possibilidades.

Detalhes importantes que devem ser observados: todas as *GPIO's* são capazes de gerar *PWM*, entretanto, apenas 10 canais distintos podem ser configurados; alguns pinos possuem funções duplas e operacionais como *RESET*, *USB*, etc; e ainda, o conversor analógico *ADC2* não pode ser utilizado em conjunto com o *WiFi*.

Com essas informações em mente, as funções necessárias (que serão detalhadas abaixo) foram atribuídas a cada *GPIO*, conforme a Tabela 3.4.

ESP32-S3-DevKitC-1

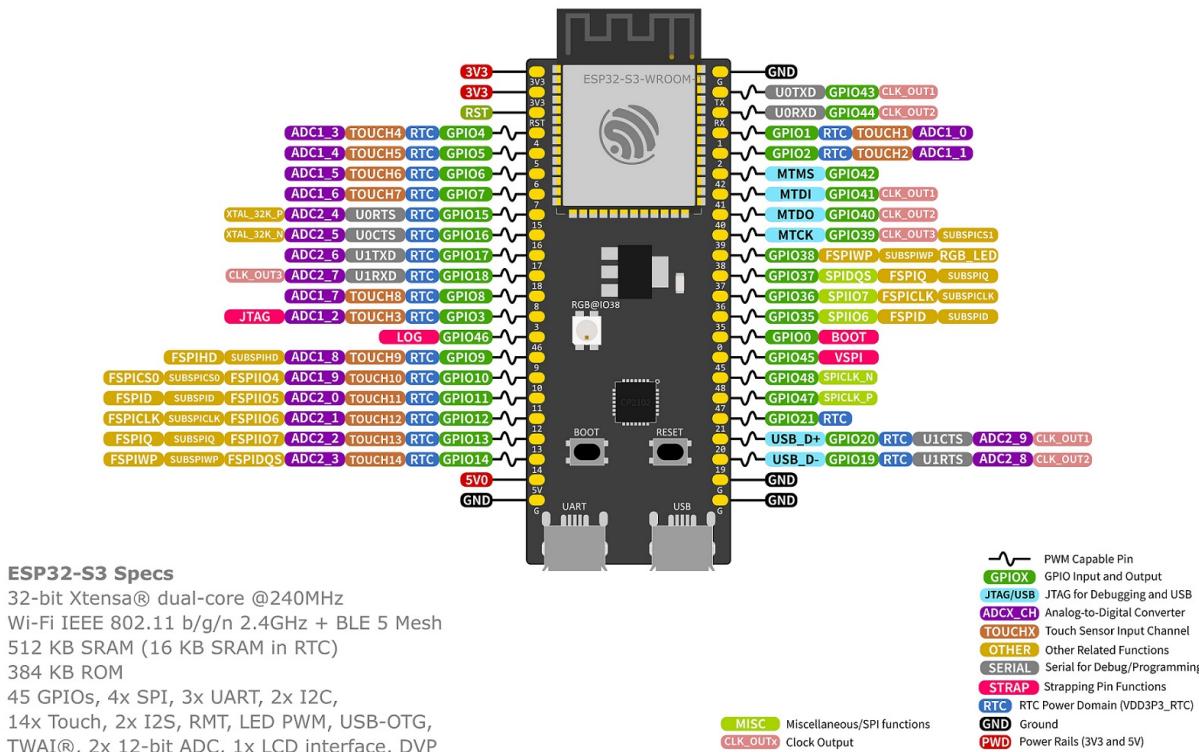


Figura 3.14 – Diagrama de *pinout* do *ESP32-S3 DevKitC-1* (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024b).

Tabela 3.4 – Mapeamento das *GPIO*'s para o projeto.

Função	GPIO
Leitura <i>encoder</i> 1	01
Leitura <i>encoder</i> 2	02
Leitura <i>encoder</i> 3	05
Leitura <i>encoder</i> 4	06
Leitura <i>encoder</i> 5	07
Leitura <i>encoder</i> 6	08
<i>PWM</i> M1	11 e 12
<i>PWM</i> M2	13 e 14
<i>PWM</i> M3	15 e 16
<i>PWM</i> M4	17 e 18
<i>PWM</i> M5	39 e 40
<i>PWM</i> M6	41 e 42
<i>IS Select</i> 1	21
<i>IS Select</i> 2	35
<i>IS Select</i> 3	36
<i>IS Select</i> 4	37
<i>IS Select</i> 5	38
<i>IS Select</i> 6	47
<i>IS Analog Read</i> 1	09
<i>IS Analog Read</i> 2	10

Os *encoders* do manipulador geram um sinal *PWM* com 5 V de amplitude e 1 kHz de frequência, como detalhado na Seção 1.3. Do ponto de vista computacional, o esforço para ler digitalmente este sinal seria demasiadamente elevado, exigindo interrupções em cada uma das seis portas utilizadas. Optou-se então por aplicar um filtro passa-baixas a fim de obter o valor médio deste sinal e realizar a leitura analógica no *ADC1* do *ESP32*.

A Figura 3.15 mostra o circuito projetado, sendo composto basicamente por uma etapa de isolamento óptico e três filtros passa-baixa analógicos de primeira ordem em cascata, isolados por amplificadores operacionais *LM358* em configuração de *buffer* (AGUIRRE, 2014).

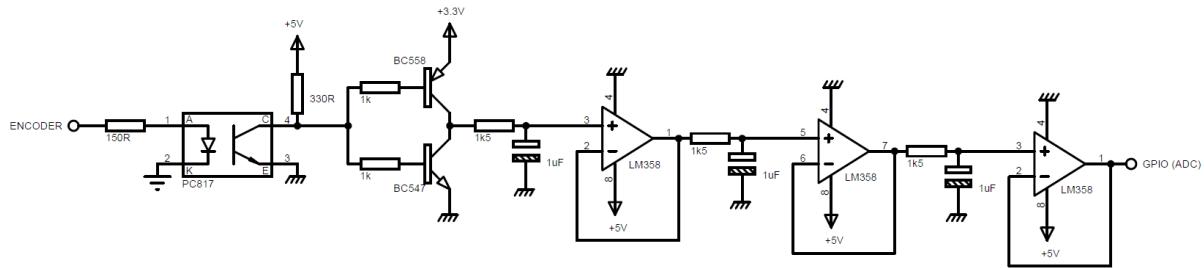


Figura 3.15 – Circuito para leitura dos *encoders*.

Em todas as etapas e circuitos da controladora desenvolvida será utilizado o acoplamento óptico (BOYLESTAD; NASHELSKY; ALVES, 2005) para isolar completamente os referenciais (*GND*) dos sinais de potência e lógica, a fim de evitar surtos e possíveis danos/interferências ao microcontrolador. Os motores e *encoders* serão alimentados por uma mesma fonte (potência) enquanto que o circuito lógico terá uma segunda alimentação independente e isolada.

O sinal *PWM* gerado pelo *encoder* aciona o fotoacoplador *PC817* com saída em configuração de emissor comum (MALVINO; BATES, 2016) e resistor de *pullup* para o nível lógico de 5 V (lógica invertida). A saída desse bloco aciona a entrada de um arranjo em meia ponte de um amplificador classe D (SEDRA; SMITH, 2015) composto por dois TJB (Transistor de Junção Bipolar): o *BC547* (*NPN*) e o *BC558* (*PNP*). A necessidade deste arranjo se dá pela capacidade de saída do fotoacoplador e também pela resistência de *pullup*, que alterariam as propriedades da próxima etapa (filtragem). Além disso, o arranjo inverte novamente a lógica e, ao ser alimentado com 3,3 V, assegura o sinal com esta amplitude, que é o nível lógico de operação do *ESP32*. Por fim, o sinal entra em uma cascata de filtros passa-baixa de primeira ordem projetados conforme a Seção 2.2.4. Foram escolhidos os valores comerciais de $R = 1,5 \text{ k}\Omega$ e $C = 1 \mu\text{F}$, atendendo o requisito estabelecido ($\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$) e gerando resposta conforme a mostrada na Figura 3.16.

A ordem do filtro foi escolhida em atenção ao tempo de acomodação e o *ripple*, visando uma resposta mais rápida e filtrada possível, atentando-se ainda para o quesito econômico e dimensional (número e dimensões de componentes e placas).

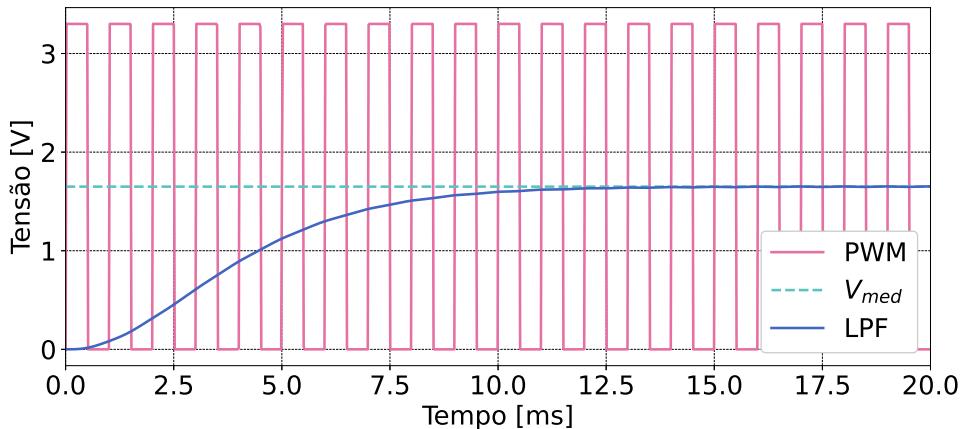


Figura 3.16 – Resposta dos filtros passa-baixas em cascata (3^a ordem).

Após pesquisa e estudos de viabilidade, dentre as opções de controlar os motores com tiristores diretamente da rede, por exemplo, ou até mesmo conversores *buck* com arranjos meia ponte, optou-se por utilizar pontes H completas. A dificuldade desta solução trata-se da alta corrente consumida pelos motores, exigindo transistores ou *mosfets* de alta potência, além do próprio número de componentes, o que deixaria a placa com dimensões exageradas. Desta forma adotou-se o *BTS7960b*, que é um *CI* de meia ponte muito utilizado em *drivers* de acionamento para motores de até 45 V e 40 A (INFINEON TECNOLOGIES, 2004).

O *CI* é composto basicamente por um arranjo interno de *mosfets* em meia ponte e seus circuitos de acionamento e auxiliares. Os pinos básicos são os de alimentação (*VS* e *GND*), saída (*OUT*) e acionamento/*enable* (*INH*). Ademais, o pino *SR* é utilizado para ajustar o *slew rate*, que trata-se da taxa de chaveamento dos *mosfets*, ou seja, o quanto rápido eles saturarão a saída. O pino *IS* fornece uma corrente proporcional à entregue ao motor, permitindo a leitura dessa corrente. Por fim, o pino *IN* recebe o *PWM* para acionamento dos *mosfets* internos.

A Figura 3.17 mostra o circuito de acionamento para um motor, com dois sub-circuitos simétricos de meia ponte, formando o *driver* completo.

A alimentação do *BTS7960* é feita pelos pinos *VS* e *GND*, por meio de uma fonte específica para os circuitos de potência. A saída do *CI* (*OUT*) é conectada a um dos terminais do motor. O sinal de *PWM*, gerado pelo *ESP32*, passa pelo arranjo com fotoacoplador e aciona a ponte pela porta *IN*. O pino *INH* é mantido em alto para manter o *CI* ativo. O resistor conectado ao pino *SR* é dimensionado conforme recomendação do *datasheet*, para um *slew rate* médio recomendado pelo fabricante (INFINEON TECNOLOGIES, 2004).

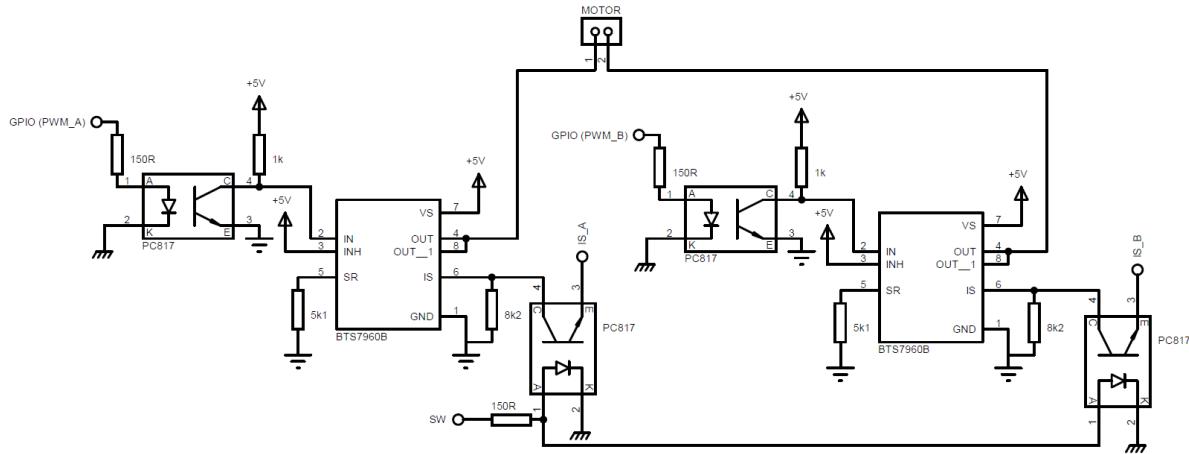


Figura 3.17 – Circuito de potência para acionamento dos motores.

O resistor conectado ao pino *IS* é dimensionado conforme dados do fabricante e também de forma a atender os limites de nível lógico do *ESP32* (3,3 V). Uma vez que a corrente sobre esse resistor será proporcional à do motor, é possível utilizá-lo como resistor *shunt* para leitura de corrente.

Devido à alta demanda e número de leituras analógicas limitadas, a leitura de corrente será realizada de forma multiplexada, ou seja, os sinais *SW* vindos do *ESP32* como *IS Select* da Tabela 3.4 selecionam aquele motor para leitura da corrente. Os fotoacopladores chaveiam a tensão de *shunt* de cada braço da meia ponte para um outro circuito de condicionamento e consequente leitura.

Após a seleção do motor que deseja-se ler a corrente, via *IS Select*, os fotoacopladores correspondentes direcionam as tensões de *shunt* de cada braço para dois circuitos idênticos, mostrados na Figura 3.18. O sinal, em relação ao referencial de potência, é espelhado no referencial lógico e direcionado à GPIO que fará a leitura (*IS Analog Read*).

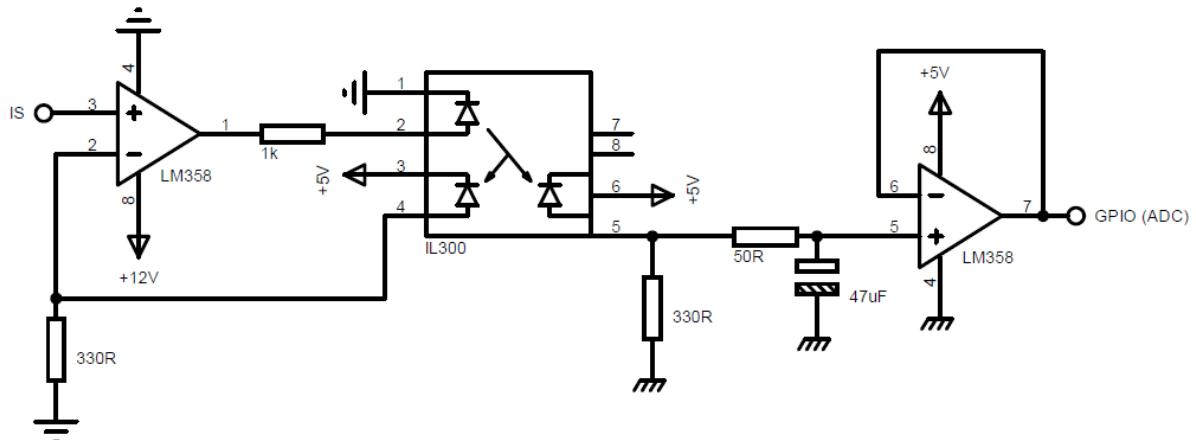


Figura 3.18 – Circuito para leitura de corrente dos motores.

A base desse circuito é o fotoacoplador linear *IL300*, que possui uma entrada e duas saídas idênticas, e região linear maior que a de um fotoacoplador convencional, que geralmente é utilizado para sinais digitais. O sinal analógico em tensão é transmitido ao circuito lógico por corrente (SIEMENS, 2004). A tensão de *shunt* *IS* entra num circuito de espelho de corrente (SEDRA; SMITH, 2015) que excita o *IL300*, utilizando uma das saídas como *feedback*. Assim, a corrente espelhada será baseada na tensão de *shunt* e no resistor de $330\ \Omega$, gerando uma queda de tensão de mesmo valor do outro lado do acoplamento óptico (circuito lógico). Por fim, uma etapa de filtragem e *buffer* foi adicionada à saída, a fim de estabilizar o sinal, atenuando flutuações e sinais espúrios.

Os circuitos mencionados foram testados separadamente em *protoboard* e funcionaram conforme esperado. Estão sendo confeccionadas placas para testes completos e eventuais ajustes para as versões definitivas. Ademais, detalhes como uma possível substituição dos filtros em cascata por outra topologia, como a *sallen-key* (AGUIRRE, 2014), serão analisados, em ordem de melhorar a funcionalidade, reduzir custos e otimizar o espaço físico ocupado pelos circuitos.

3.7 Projeto e Sintonia do Controlador

Será desenvolvido posteriormente.

3.8 Software e Firmware

Será desenvolvido posteriormente.

4 Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados, bem como uma discussão analítica e quantitativa acerca do desempenho e melhorias obtidos em relação ao sistema original. Ademais, são documentados os custos envolvidos no projeto a fim de comparar e justificar o viés econômico: baixo custo.

Será desenvolvido posteriormente.

5 Considerações Finais

Neste capítulo são realizadas as considerações finais como um balanço geral do trabalho proposto e desenvolvido, sua aplicabilidade e a apresentação das perspectivas de avanço e continuidade do projeto.

5.1 Conclusão

Considerando-se o cronograma apresentado na proposta, metade do período teórico de conclusão do trabalho se passou (6 meses). A revisão e manutenção eletromecânica do ED-7255 foi concluída, assim como as modelagens cinemáticas, planejamento e geração de trajetória, e modelagem dos atuadores.

Foram realizados os projetos dos circuitos de condicionamento, controle e potência, além de seus testes e ajustes individuais em simulações e *protoboard*. A próxima etapa consistirá na confecção de placas (processo já em andamento) para teste definitivo de todos os circuitos em conjunto. Após os testes, validação e possíveis alterações nos circuitos, serão desenvolvidas e produzidas as placas definitivas, finalizando a etapa de eletrônica.

Com o *hardware* desenvolvido e funcional, será possível realizar a modelagem dinâmica restante do sistema, a partir da obtenção dos parâmetros por ensaios de excitação harmônica forçada e análise da resposta (caixa cinza). Consequentemente, poderá-se realizar o projeto e sintonia dos controladores a serem aplicados à cada junta individualmente (controle independente por junta).

Ressalta-se ainda que, esta etapa de inclusão da dinâmica do sistema não é objetivo primário do trabalho, mas sim um adicional que melhora o transitório do sistema. Em caso de escassez de tempo, o servo controle implementado sobre os modelos cinemáticos já obtidos são suficientes para o controle de regulação de posição proposto.

Por fim, a implementação final se dará em torno do *firmware* a ser embarcado no ESP32 e também da criação e aperfeiçoamento da *IHM* dedicada, que envolve um servidor e um arranjo de comunicação em tópicos (*MQTT*) já desenvolvida em uma plataforma didática IoT pelo próprio autor (ALVES et al., 2024).

5.2 Sugestões de Continuidade

Será escrito ao final do trabalho.

Referências

- ABDELLATIF, H.; HEIMANN, B. Experimental identification of the dynamics model for 6-dof parallel manipulators. *Cambridge University Press*, v. 28, p. 359–368, 2010.
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. [S.l.]: Pearson Eduacation, 2014.
- AHMED, A. *Eletrônica de Potência*. [S.l.]: Pearson Eduacation, 2000.
- ALVES, E. N. M. et al. Plataforma de ensino experimental: Uma solução por abordagem via IoT. *Congresso Brasileiro de Automática*, 2024.
- ASTROM, K.; HAGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. 2nd. ed. [S.l.]: ISA, 1995.
- BANAS, W. et al. Experimental determination of dynamic parameters of an industrial robot. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
- BARHAGHTALAB, M. H. et al. Dynamic analysis, simulation, and control of a 6-dof irb-120 robot manipulator using sliding mode control and boundary layer method. *Journal of Central South University*, 2018.
- BFAZEJEZYK, B. et al. Controlling chaos in mechanical systems. *American Society of Mechanical Engineers*, 1993.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L.; ALVES, E. N. M. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 8^a. ed. [S.l.]: Pearson, 2005.
- B&R. *ACOPOSmulti Inverter Module*. [S.l.], 2024. V1.11. Disponível em: <<https://www.br-automation.com/pt-br/produtos/motion-control/acoposmulti>>.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5^a. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2013.
- COMAU ROBOTICS. *Control Unit C5G - Maintenence*. [S.l.], 2014. Rel. 0/1/2.
- DORF, R. C.; BISHOP, H. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8^a. ed. [S.l.]: LTC Editora, 2001.
- ED-CORPORATION. *ED-7255 - Industrial Robot Simulator*. 2010. 1–354 p. Disponível em: <www.ed.co.kr>.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-S3 Series Datasheet*. 2023. 1–75 p. Disponível em: <www.espressif.com>.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-S3 ESP-IDF Programming Guide*. 2024. 1–3146 p. Disponível em: <www.espressif.com>.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-S3 Technical Reference Manual*. 2024. 1–1507 p. Disponível em: <www.espressif.com>.
- FITZGERALD; KINGSLEY. *Máquinas Elétricas*. 7^a. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2014.

- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3rd. ed. [S.l.]: Ellis-Kagle Press, 1998.
- FULLER, S. et al. The python control systems library (python-control). In: IEEE. *60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.], 2021. p. 4875–4881.
- GARCIA, C. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos*. 2^a. ed. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.
- GARCIA, C. *Controle de Processos Industriais - Estratégias Convencionais*. 1^a. ed. [S.l.]: Blucher, 2017.
- HERNÁNDEZ-GUZMÁN, V. M.; ORRANTE-SAKANASSI, J. Pid control of robot manipulators actuated by bldc motors. *International Journal of Control*, 2019.
- IBRAHIM, D. *Microcontroller Based Applied Digital Control Microcontroller Based*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- INFINEON TECNOLOGIES. *BTS7960 Half-Bridge Driver Datasheet*. 2004. 1–28 p.
- KHOSLA, P. K. *Estimation of Robot Dynamics Parameters: Theory and Application*. Dissertação (Mestrado) — Carnegie Mellon University, 1987.
- KIRTLEY, J. L. *Permanent Magnet Brushless DC Motors*. 2003. Department of Electrical Engineering and Computer Science - Massachusetts Institute of Technology. Introduction to Power Systems - Chapter 12.
- KOZLOWSKI, K. R.; DUTKIEWICZ, P. Experimental identification of robot and load dynamics. *IFAC*, 1996.
- KOZLOWSKI, K. R.; DUTKIEWICZ, P. Experimental identification of dynamic parameters for a class of geared robots. *Cambridge University Press*, v. 14, p. 561–574, 1997.
- LYNCH, K. M.; PARK, F. C. *MODERN ROBOTICS: MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.
- MALVINO, A.; BATES, D. *Eletrônica*. 8^a. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2016.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics - Converters, Applications and Design*. 3rd. ed. [S.l.]: Pearson Eduacation, 2000.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6^a. ed. [S.l.]: LTC Editora, 2013.
- OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 1995.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2010.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletronic Circuits*. 7th. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2015.
- SICILIANO, B. et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. [S.l.]: Springer, 2009.
- SIEMENS. *IL300 Linear Optocoupler Datasheet*. 2004. 1–8 p.

- SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2005.
- SWEVERS, J. et al. Experimental identification of robot dynamics for control. *International Conference on Robotics & Automation*, 2000.
- TRAN, T.-T.; GE, S. S.; HE, W. Adaptive control for an uncertain robotic manipulator with input saturations. *Control Theory and Technology*, 2016.
- US DIGITAL. *MA3 Miniature Absolute Magnetic Shaft Encoder*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.usdigital.com/products/MA3>>.
- VUKOSAVIć, S. N. *Digital Control of Electrical Drives*. [S.l.]: Springer, 2007.
- ZHAO, Y. Computation of the output torque, power and work of the driving motor for a redundant parallel manipulator. *International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics*, 2011.