



COLÉGIO DE  
**S.MIGUEL**  
AMIZADE VERDADE EXIGÊNCIA

# Momentos da força aplicados a Braço Robótico

**António Primitivo, Dinis Pereira, Salvador  
Carvalho**

Departamento de Física

Colégio de São Miguel

May, 2023

## **Momentos da força aplicados a Braço Robótico**

António Primitivo, Dinis Pereira, Salvador Carvalho, .

Departamento de Física, Colégio de São Miguel, May, 2023.

### **Resumo**

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e validação do protótipo de um braço robótico com cinco graus de liberdade, capaz de desenvolver os nossos conhecimentos nas áreas da física e da robótica. Para o desenvolvimento deste projeto, foi tido em consideração um conjunto de funcionalidades e parâmetros que tinham que ser cumpridos. Entre os mais importantes encontra-se o número de graus de liberdade que permitem realizar um número de movimentos limitado. Fez-se uma investigação sobre robótica, mais concretamente braços robóticos e a sua estrutura, assim como as diversas áreas de interesse para o seu desenvolvimento. O processo de produção inerente à produção de alguns componentes do protótipo também foi abordado. Para além do conhecimento necessário em relação à robótica, foi, também, importante o uso de projetos com filosofia open source, para obter recursos uteis ao desenvolvimento do projeto. O desenho do protótipo foi realizado num software de CAD(Fusion 360), de modo a analisar a montagem num ambiente virtual antes de passar ao seu fabrico. O dimensionamento dos componentes e a sua seleção apoiou-se na execução de cálculos e análises simplificadas. Foi, também, analisada a componente elétrica e de firmware/software, responsável pelos inputs de controlo. Os componentes foram fabricados, usando processos de impressão 3D. Foram feitos testes elétricos e pré-montagem, dos vários componentes. Após a montagem dos componentes elétricos do protótipo, foram efetuadas as verificações e calibrações necessárias, de modo a certificar o correto funcionamento, assim como análises de performance relativamente ao controlo do movimento.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a todos aqueles que nos ajudaram no desenvolvimento deste trabalho:

Ao professor do IPL, Pedro Alexandre Clemente Fernandes, pelo apoio e orientação ao longo de todo este projeto e a todos os outros professores que nos acompanharam ao longo de toda a nossa vida académica.

Um agradecimento aos professores Paulo Figueira, Carla Velez e Cláudio Barroca pelo apoio e pelo ótimo ambiente de trabalho providenciado.

Um agradecimento a todas as nossas famílias pelo apoio incondicional e por estarem sempre presentes.

A todos os nossos amigos que nos acompanharam, desde 2005, e que estiveram sempre lá para nós.

E a todos os outros que se cruzaram connosco e nos ajudaram a alcançar os nossos objetivos pessoais e académicos.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Motivação do Projeto . . . . .	1
1.2	Contextualização do objeto de estudo -ChatGPT . . . . .	2
1.3	Objetivos do Projeto . . . . .	4
1.4	Metodologia . . . . .	4
1.5	Estrutura . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1	Robótica . . . . .	6
2.1.1	Robótica Avançada . . . . .	8
2.1.1.1	Robôs de Campo . . . . .	9
2.1.1.2	Robôs de Serviço . . . . .	9
2.2	Estrutura Mecânica . . . . .	9
2.2.1	Manipuladores robóticos . . . . .	9
2.2.2	Robôs móveis . . . . .	10
2.3	Modelação, Planeamento e Controlo de Robôs . . . . .	10
2.3.1	Modelação . . . . .	10
2.3.2	Planeamento . . . . .	11
2.3.3	Controlo de Movimento . . . . .	11
2.3.3.1	Arduino . . . . .	12
2.3.3.2	A4988 Driver . . . . .	12
2.3.4	Impressão 3D . . . . .	13

2.3.5	Resumo . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>14</b>
3.1	Presuposições . . . . .	14
3.2	Projetos de código aberto . . . . .	14
3.2.1	Código Aberto . . . . .	15
3.2.2	Jelle Vermandere . . . . .	15
3.2.3	SmartBuilds . . . . .	15
3.3	Desenho do Robô . . . . .	16
3.4	Cálculos . . . . .	17
3.4.1	Motor Stepper e Servo . . . . .	17
3.4.1.1	Momento da força dos Motores . . . . .	17
3.4.2	Fontes de Alimentação . . . . .	19
3.5	Resumo . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Controlo de Movimento</b>	<b>21</b>
4.1	Cinemática . . . . .	21
4.1.1	Cinemática Direta . . . . .	21
4.1.1.1	Notação de Denavit-Hartenberg . . . . .	21
4.1.1.2	Parâmetros do Protótipo segundo a Notação Denavit-Hartenberg . . . . .	24
4.1.2	Cinemática Inversa . . . . .	26
4.1.3	Cinemática Diferencial . . . . .	27
4.2	Modelo Dinâmico . . . . .	28
4.3	Controlo . . . . .	29
4.3.1	Eletrónica . . . . .	29
4.3.1.1	Montagem da Eletrónica . . . . .	29
4.3.1.2	Firmware . . . . .	30
4.4	Resumo . . . . .	30

<b>5</b>	<b>Implementação</b>	<b>31</b>
5.1	Impressão 3D . . . . .	31
5.1.1	FDM . . . . .	31
5.2	Montagem e Testes . . . . .	32
5.3	Desempenho . . . . .	32
5.4	Resumo . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimento Futuro</b>	<b>34</b>
6.1	Conclusões Finais . . . . .	34
6.2	Perspetivas de Trabalho Futuro . . . . .	35
6.3	Comentário Crítico à contextualização do objeto de estudo por parte do ChatGPT . . . . .	36

# Imagens

2.1	Projeções para o número de robôs em 2020 . . . . .	8
4.1	Parâmetros de Denavit-Hartenberg . . . . .	22
4.2	Ligações dos Parâmetros de Denavit-Hartenberg . . . . .	23
4.3	Sistemas de Coordenadas atribuídas ao Protótipo . . . . .	26
4.4	Circuito Eletrônico . . . . .	30

# Capítulo 1

## Introdução

Este capítulo pretende apresentar o enquadramento e a motivação deste projeto. Os objetivos do projeto, metodologia e estrutura deste trabalho são também descritos.

### 1.1 Enquadramento e Motivação do Projeto

A robótica tem desempenhado um papel significativo em diversas áreas da sociedade moderna, desde a indústria até a medicina e a exploração espacial. Os braços robóticos são componentes essenciais desses sistemas automatizados e têm sido amplamente utilizados para executar tarefas complexas, precisas e repetitivas. Com o avanço da tecnologia, a demanda por braços robóticos mais eficientes, versáteis e autônomos tem aumentado consideravelmente. Neste contexto, o presente projeto visa o desenvolvimento de um braço robótico capaz de atender a essas necessidades crescentes.



## 1.2 Contextualização do objeto de estudo -ChatGPT

**Pergunta:** Elabora um texto formal de até 200 palavras onde explores os conceitos físicos relacionados a um braço robótico?

**Resposta:** A aplicação de conceitos físicos desempenha um papel crucial no desenvolvimento e funcionamento de um braço robótico. Esses conceitos permitem compreender e controlar os movimentos, as forças e as interações envolvidas nesses sistemas mecatrônicos avançados.

Um dos principais conceitos físicos aplicados a um braço robótico é a cinemática, que estuda o movimento dos corpos sem levar em consideração as forças externas. Através da cinemática, é possível determinar as posições, velocidades e acelerações das articulações do braço robótico, permitindo o planejamento de trajetórias precisas e suaves.

Além disso, a dinâmica é um conceito fundamental ao analisar as forças e os momentos que atuam no braço robótico. Ao aplicar a dinâmica, podemos compreender as interações entre as articulações, bem como as forças resultantes da manipulação de objetos e o efeito da gravidade. Essas informações são essenciais para projetar um sistema capaz de suportar cargas, garantindo estabilidade e segurança durante as operações.

A aplicação de conceitos físicos também é crucial no controle do braço robótico. Os controladores baseados em feedback de sensores permitem ajustar as forças e as posições das articulações, proporcionando movimentos mais precisos e suaves. Além disso, técnicas de controle avançadas, como o controle por realimentação de estado, podem ser aplicadas para otimizar o desempenho do sistema.

Em resumo, a aplicação de conceitos físicos possibilita compreender e modelar o comportamento dos braços robóticos, desde a cinemática e a dinâmica até o controle preciso dos movimentos. Essa compreensão é essencial para o desenvolvimento de sistemas robóticos eficientes e adaptáveis, capazes de realizar tarefas complexas em diversos setores, como a indústria, a medicina e a exploração espacial.

**Pergunta:** Elabora um texto formal de 100 a 150 palavras sobre como é possível colocar a robótica e a inteligência computacional ao serviço do bem humano?

**Resposta:** A robótica, quando colocada ao serviço do bem humano, tem o potencial de transformar positivamente a sociedade em diversas áreas. Através da utilização da robótica, podemos melhorar a qualidade de vida das pessoas, impulsionar a eficiência produtiva e enfrentar desafios complexos.

Na área da saúde, os robôs podem ser utilizados em cirurgias de alta precisão, contribuindo para a recuperação mais rápida dos pacientes e reduzindo os riscos associados a intervenções cirúrgicas. Além disso, a robótica assistiva pode auxiliar pessoas com mobilidade reduzida, oferecendo maior autonomia e independência.

No setor industrial, a robótica possibilita a automação de processos, aumentando a eficiência e a produtividade das empresas. Isso permite a criação de ambientes de trabalho mais seguros e a libertação dos colaboradores para tarefas mais complexas e criativas.

A robótica também desempenha um papel importante na exploração espacial, na proteção do meio ambiente e na resposta a desastres naturais, possibilitando a realização de tarefas arriscadas e perigosas sem colocar vidas humanas em risco.

Em resumo, a robótica aplicada de forma responsável e ética pode trazer inúmeros benefícios para a sociedade, proporcionando melhorias na saúde, aumento da produtividade e enfrentamento de desafios. É importante aproveitar o potencial da robótica para criar um futuro mais humano, onde a tecnologia seja utilizada para o bem-estar e o progresso da humanidade.

## **1.3 Objetivos do Projeto**

O principal objetivo deste trabalho é projetar e validar um braço robótico de cinco graus de liberdade com a finalidade de simular um braço real. O braço robótico deve ser capaz de realizar movimentos, com estabilidade e precisão corretas. O desenvolvimento do braço robótico foi apoiado por projetos de código aberto.

Para alcançar o objetivo principal, o projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Projeto e validação dos componentes do braço robótico;
- Implementação de hardware/eletrônica e software/firmware;
- Teste de controle de movimento do protótipo.

## **1.4 Metodologia**

Para desenvolver um bom protótipo, é necessário obter o máximo de informações possível sobre o tópico em que se pretende trabalhar. Portanto, o primeiro passo do projeto foi uma revisão bibliográfica sobre robótica. Foi abordada uma breve apresentação sobre a história desde o início até o presente, os diferentes tipos de robôs e os parâmetros que os caracterizam, bem como as tecnologias e processos para projetar e construir as peças necessárias para criar um protótipo. Também foi realizado um estudo sobre projetos de código aberto disponíveis que poderiam servir como base para o projeto.

O segundo passo do projeto consistiu no redesenho e validação em CAD(Fusion 360) de todas as peças e componentes para construir adequadamente o protótipo. Após isso, foi necessário fabricar as peças e testar a eletrônica.

A etapa final foi o teste do controle de movimento do protótipo para validar e obter resultados em relação ao seu desempenho.

## 1.5 Estrutura

Além deste capítulo, este projeto está organizado em mais cinco capítulos:

- Capítulo 2: Revisão da Literatura. Este capítulo apresenta uma introdução à robótica, abrangendo a história e tópicos importantes sobre robótica, bem como uma introdução ao processo de impressão 3D.
- Capítulo 3: Desenvolvimento. Este capítulo descreve todo o processo de desenvolvimento, desde o redesenho de peças até a seleção e validação de componentes.
- Capítulo 4: Controle de Movimento. Este capítulo aborda o tema do controle de movimento, o modelo cinemático, eletrônica e software de controle.
- Capítulo 5: Implementação. Este capítulo descreve os processos de produção das peças, bem como a montagem e testes. Também aborda melhorias futuras.
- Capítulo 6: Conclusões e Trabalho Futuro. Este capítulo apresenta as conclusões do projeto e perspectivas futuras de trabalho. Comentário crítico à contextualização do objeto de estudo por parte do ChatGPT.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Este capítulo esclarece tópicos da área da robótica e o processo de produção utilizado para algumas peças neste projeto. A robótica é introduzida, assim como sua história abrangente e tópicos importantes, a estrutura mecânica e o movimento dos robôs, o planeamento e o controlo. Também é feita uma introdução ao processo de impressão 3D.

### 2.1 Robótica

O campo da robótica pode ser reconhecido como um assunto interdisciplinar que abrange as áreas culturais da mecânica, computação e eletrônica. Este estuda máquinas que podem substituir os seres humanos em várias tarefas, seja físicas ou de tomada de decisão. Esta é uma ambição muito antiga, como pode ser observado em contos antigos, como a lenda de Prometeu, o Titã que criou os seres humanos a partir do barro, ou Frankenstein, nos tempos modernos. O conceito de robô como um artefacto mecânico, sem sentimentos, surgiu na década de 1940 com Isaac Asimov, um escritor russo de ficção científica; o comportamento do robô era controlado por um cérebro "positrônico" programado por humanos para cumprir certas regras de conduta ética. Asimov introduziu o termo "Robótica" como a ciência que estuda os robôs e baseou-se em três leis fundamentais:

- Primeira lei: Um robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra danos;
- Segunda lei: Um robô deve obedecer às ordens dadas pelos seres humanos, exceto quando estas ordens entram em conflito com a Primeira Lei;
- Terceira lei: Um robô deve proteger a sua própria existência, desde que essa proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis.

Estas leis são a base para projetar robôs que, desde então, têm a conotação de um produto industrial desenvolvido por engenheiros e técnicos especializados. Em uma interpretação científica, um robô é uma máquina que pode modificar o ambiente operacional no qual opera.

Um sistema robótico é um sistema complexo, representado por vários subsistemas. O componente essencial é o sistema mecânico, provavelmente com um mecanismo de locomoção (rodas, pernas mecânicas) e um mecanismo de manipulação (braços mecânicos, mãos artificiais). A concretização deste sistema refere-se ao quadro de projeto de sistemas mecânicos articulados e escolha de materiais.

A capacidade de executar uma ação, tanto de locomoção quanto de manipulação, é produzida por um sistema de atuação, que anima os componentes mecânicos do robô. O projeto desse sistema é essencial para garantir o desempenho adequado do robô em termos de velocidade, precisão e força aplicada. O sistema de atuação pode incluir motores, atuadores hidráulicos ou pneumáticos, bem como sistemas de controle para coordenar os movimentos do robô.

Além disso, o sistema robótico requer um sistema de percepção para obter informações sobre o ambiente e o próprio robô. Isso pode envolver sensores como câmeras, sensores de proximidade, sensores de força/momento da força, entre outros, dependendo das tarefas específicas que o robô deve realizar. A percepção é crucial para permitir que o robô entenda e interaja com o ambiente de forma inteligente.

No geral, a robótica é um campo fascinante que abrange várias disciplinas e tem aplicações em diversos setores, como manufatura, medicina, exploração espacial,

agricultura, entre outros. O estudo e desenvolvimento de robôs continuam a avançar, levando a avanços significativos na automação e no auxílio às atividades humanas.

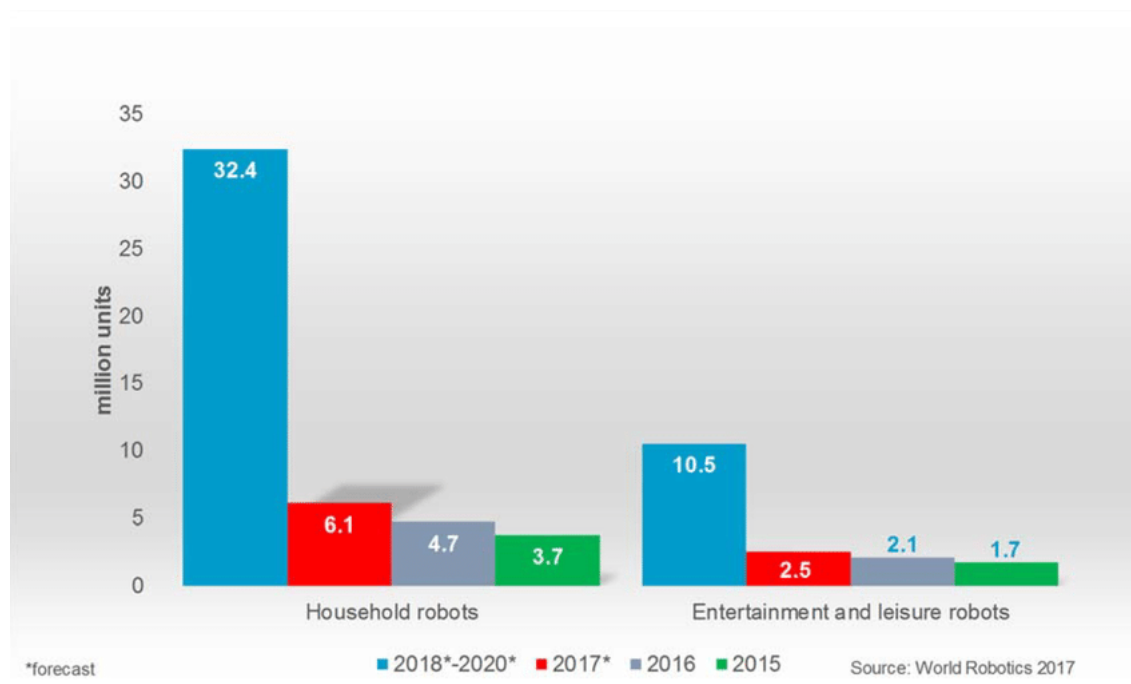


Figure 2.1: Projeções para o número de robôs em 2020

### 2.1.1 Robótica Avançada

A robótica avançada é a disciplina relacionada ao estudo de robôs com características de autonomia, que operam em ambientes mal estruturados ou não estruturados, com características geométricas e físicas desconhecidas a priori. Este campo ainda está na sua fase inicial, mas há muitas motivações para aprender e estudar mais sobre todas as tecnologias associadas. A necessidade de encontrar uma alternativa para explorar ou realizar atividades que não são seguras ou possíveis para um ser humano (robôs de campo), ou desenvolver produtos para melhorar a qualidade de vida (robôs de serviço) são alguns mercados que motivam o desenvolvimento da área da robótica.

#### **2.1.1.1 Robôs de Campo**

Os robôs de campo são usados para realizar atividades que os seres humanos não são capazes de realizar ou que nos poderiam colocar em perigo. Cenários típicos incluem a exploração de oceanos profundos, o espaço ou áreas contaminadas. Quando ocorre uma catástrofe, como incêndios em túneis ou terremotos, equipes de resgate podem operar em conjunto com estes robôs.

#### **2.1.1.2 Robôs de Serviço**

Atualmente, é possível transformar protótipos em produtos comerciais; devido a esta razão, a tecnologia da área da robótica de serviço está cada vez a crescer mais e desta forma a substituir tarefas quotidianas. Por estas razões existem cada vez mais produtos que podem melhorar a qualidade de vida da população idosa e de pessoas com deficiência através de cadeiras de rodas autônomas, elevadores auxiliares de mobilidade ou robôs de reabilitação.

## **2.2 Estrutura Mecânica**

A característica mais importante do robô é a sua estrutura mecânica. Normalmente, os robôs são classificados como:

- Manipuladores robóticos, com uma base fixa;
- Robôs móveis, com uma base móvel.

### **2.2.1 Manipuladores robóticos**

A estrutura mecânica de um manipulador robótico consiste em uma sequência de corpos, ou elos, conectados por uma articulação.

Uma cadeia cinemática aberta pode ser descrita como uma cadeia em que há apenas uma sequência de elos a conectar a base e parte final do braço. A cadeia cinemática aberta é a estrutura fundamental do manipulador. Quando uma



sequência de elos forma um loop, a cadeia cinemática é fechada. As articulações garantem a mobilidade do manipulador e podem ser classificadas em diferentes categorias, de acordo com o movimento que dois elos conectados por essa articulação são capazes de realizar. Em uma cadeia cinemática aberta, cada articulação fornece à estrutura um grau de liberdade adicional.

O número de graus de liberdade (GL) é igual ao número de variáveis de posição independentes que um manipulador possui e que precisam ser especificadas para localizar todas as partes do mecanismo. Para realizar a tarefa de maneira adequada, é necessário distribuir adequadamente os graus de liberdade. No caso de um robô industrial típico, o número de articulações é igual ao número de GL, porque um manipulador geralmente é uma cadeia cinemática aberta e cada articulação é geralmente definida com uma única variável.

### **2.2.2 Robôs móveis**

Comparado com um manipulador robótico, a principal característica de um robô móvel é a capacidade de se mover livremente no ambiente, devido à base móvel. Este tipo de robô é usado principalmente em aplicações de serviços, onde são necessárias capacidades de movimento autônomo e extenso.

## **2.3 Modelação, Planeamento e Controlo de Robôs**

### **2.3.1 Modelação**

Cinemática é a ciência do movimento, que neste contexto descreve o movimento de uma estrutura mecânica de um robô em relação a um referencial cartesiano fixo, ignorando as forças e momento das forças. No que diz respeito a um manipulador robótico, a cinemática caracteriza a relação analítica entre as posições e orientações dos eixos e do produto final. Para estudar a cinemática de um manipulador robótico, existem dois tópicos importantes a serem abordados:

- Cinemática direta: determinação da posição e orientação da parte final do braço como função das variáveis dos eixos utilizando ferramentas de álgebra linear.
- Cinemática inversa: determinação das variáveis dos eixos como função da posição e orientação da parte final do braço utilizando ferramentas de álgebra linear.

A junção de ambas estas cinemáticas é crucial para garantir o movimento desejado do produto final. A cinemática diferencial caracteriza a relação analítica entre o movimento dos eixos e da parte final do braço em termos de velocidades.

Para escolher adequadamente os atuadores, controlar e simular o movimento do manipulador, é necessário um modelo dinâmico. Para a análise dinâmica, o movimento do manipulador leva em conta as forças e momento das forças atuantes sobre ele.

### 2.3.2 Planeamento

O planeamento da trajetória de um manipulador robótico é menos complexo em comparação com robôs móveis, devido às restrições que as rodas geram. Para um manipulador, é possível atribuir um movimento aos eixos ou diretamente à parte final do braço, dependendo do propósito do robô, como manipulação de objetos. O objetivo principal do planeamento da trajetória é gerar as leis de temporização para as variáveis relevantes, seja dos eixos ou da parte final do braço, com uma descrição precisa do movimento desejado.

### 2.3.3 Controlo de Movimento

Para realizar o movimento pretendido através de leis de controlo, é necessário aplicar atuadores, sensores e um sistema de controle que implemente estas leis. O controlo de um manipulador robótico, como mencionado anteriormente, é um problema complexo, pois o movimento de um elo influencia o movimento de outros elos, e

é necessário encontrar o comportamento temporal dos atuadores para garantir o movimento desejado. As equações de movimento revelam a presença de efeitos dinâmicos de acoplamento entre os eixos. A síntese das forças e momento das forças dos eixos não deve ser feita considerando apenas o conhecimento do modelo dinâmico, pois isso não descreve completamente a estrutura real. Portanto, o controle do manipulador é confiado ao fechamento de laços de retroalimentação; ao computar a discrepância entre as entradas de referência e os dados fornecidos pelos sensores proprioceptivos, um sistema de controle de retroalimentação é capaz de atender aos requisitos de precisão na execução do movimento desejado.

#### **2.3.3.1 Arduino**

O Arduino é um microcontrolador programável. Este processa as entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados. Estas placas são compostas por um microprocessador Atmel AVR, um oscilador e um regulador de tensão de 5V. Este também pode ter uma porta USB para permitir a conexão a um computador para upload ou recuperação de dados. A placa expõe os pins de entrada e saída do microcontrolador para que seja possível conectá-los a outros circuitos ou sensores.

Para programar o Arduino, é usado o Arduino IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), um software gratuito que permite a programação na linguagem que o Arduino compreende. A linguagem é baseada em C/C++ e pode até ser estendida por meio de bibliotecas em C++. Com o IDE, é possível escrever instruções passo a passo e fazer o upload destas. O Arduino então executará essas instruções e irá interagir com os componentes que estão ligados a este.

#### **2.3.3.2 A4988 Driver**

O driver A4988 é um driver de motores do tipo stepper que utiliza o chip A4988. Com esta tecnologia e ajuste automático, os motores funcionam com menos ruído, menor aquecimento, movimento mais suave e têm melhor desempenho em alta velocidade,

em comparação com outros drivers disponíveis no mercado.

### 2.3.4 Impressão 3D

A revolução industrial e, portanto, a fabricação tradicional, que geralmente são tecnologias subtrativas, impulsionaram o mundo como o conhecemos. No entanto, devido às limitações destas tecnologias em relação à forma final, custo, velocidade de produção e necessidade de operadores especializados, foram desenvolvidas abordagens novas. Para produzir de forma rápida, mais barata e produtos complexos, as tecnologias aditivas, baseadas na adição de material camada por camada, mostraram-se uma boa alternativa. A impressão 3D é uma das melhores opções em comparação com outras tecnologias aditivas, devido ao custo do equipamento e à fácil integração com software CAD(Fusion 360).

O protótipo pode ser impresso usando diferentes tecnologias e materiais de impressão 3D, que se diferenciam com base em várias características. Como geralmente não há um processo e materiais ideais, é necessário avaliar qual será o objetivo final da peça prototipada. Alguns dos fatores que afetam essa escolha são as propriedades mecânicas, estéticas, tempo de produção e custo.

### 2.3.5 Resumo

A introdução feita neste capítulo, sobre robótica, foi crucial para entender os diferentes tipos de robôs, a sua aplicação e como o movimento é controlado e realizado. O processo de impressão 3D, que será usado para produzir algumas peças, também é abordado para entender o motivo de seu uso.

# Capítulo 3

## Desenvolvimento

Este capítulo apresenta algumas pesquisas sobre projetos de código aberto, o design do protótipo e os cálculos feitos para validar alguns componentes.

### 3.1 Presuposições

Para realizar tarefas menos exigentes, o desafio foi projetar e validar um braço robótico de cinco graus de liberdade, com base em projetos de código aberto. A ideia de construir um braço robótico não era nova e alguns dos componentes já estavam disponíveis, portanto, um dos requisitos era usar esses componentes. Outros recursos disponíveis eram a impressora 3D, uma Ender 3 Max Neo.

### 3.2 Projetos de código aberto

O objetivo era escolher um projeto de código aberto e fazer as modificações necessárias para realizar as tarefas pretendidas. Após algumas pesquisas online, foram considerados dois projetos.

### 3.2.1 Código Aberto

O GitHub é a maior comunidade de código aberto do mundo, com milhões de projetos. Este é principalmente usado para compartilhar, ter acesso e modificar o código compartilhado. Com o sucesso do conceito de código aberto em relação ao software, alguns projetos de hardware começaram a aplicar este modelo, o que ajudou os consumidores que desejam alternativas de baixo custo a ter acesso a eles. Uma das maiores comunidades em relação ao hardware de código aberto é a plataforma hackday. Para que um projeto seja considerado de código aberto, a sua licença deve se qualificar como "Open Source". Isso significa que a licença deve permitir a exploração comercial não exclusiva do trabalho licenciado, disponibilizar o código-fonte do trabalho e permitir a criação de obras derivadas a partir do próprio trabalho.

### 3.2.2 Jelle Vermandere

Jelle Vermandere, um famoso youtuber e entusiasta da área da robótica, projetou um incrível braço robótico . Com base na sua paixão por compartilhar conhecimento e promover a ideia de código aberto, Vermandere decidiu disponibilizar o código e esquemas dos circuitos do braço robótico para que qualquer pessoa pudesse construí-lo.

O braço robótico projetado por Jelle Vermandere é um exemplo impressionante de engenhosidade e criatividade. Com várias articulações e movimentos fluidos, o braço robótico é capaz de realizar uma ampla gama de tarefas com precisão e destreza. Desde pegar objetos até realizar movimentos complexos, o braço robótico de Vermandere demonstra um alto nível de funcionalidade.

### 3.2.3 SmartBuilds

O youtuber SmartBuilds, conhecido pelo seu interesse em projetos DIY, também desenvolveu um impressionante braço robótico. Devido à sua abordagem prática

e acessível, SmartBuilds projetou um braço robótico que pode ser construído utilizando materiais comuns e componentes eletrônicos facilmente disponíveis.

O trabalho do youtuber SmartBuilds no desenvolvimento de um braço robótico DIY é um exemplo inspirador para todos aqueles que desejam mergulhar no mundo da robótica. Devido à sua abordagem prática e acessível mostra que é possível criar projetos robóticos incríveis com recursos limitados, promovendo a aprendizagem, a criatividade e a diversão.

### **3.3 Desenho do Robô**

O primeiro passo do projeto estava concluído após se chegar à conclusão de que misturar ambos os projetos e juntar as melhores partes de ambos seria o ideal. O próximo passo seria desenhar as peças para que pudessem ser imprimidas na impressora 3D uma vez que estas não estavam disponíveis. Para realizar esta tarefa foi necessário utilizar um software de CAD, Fusion360.

CAD ou design assistido por computador e fabricação assistida por computador é definido como uma tecnologia que melhora a integração entre o design e a produção, utilizando um sistema computacional.

A vantagem de desenhar o robô e todos os componentes antes da fabricação e montagem é a possibilidade de avaliar restrições em relação a colisões e testar diferentes conceitos mecânicos. Para facilitar o projeto e a montagem do protótipo, dividimos a estrutura em três módulos; Todos os desenhos estão disponíveis para download na nossa pasta do Github.

## 3.4 Cálculos

Com o braço robótico projetado, foi necessário avaliar se os motores stepper e servo, poderiam realizar as tarefas requeridas em termos de momento da força e dimensões. Os cálculos a seguir validam todo o equipamento escolhido.

### 3.4.1 Motor Stepper e Servo

Os motores stepper e servo são motores DC que se movem em passos iguais. O eixo do motor gira quando uma fase é energizada. Se o objetivo for de posicionamento preciso, controle de velocidade ou momento da força em baixas velocidades, este tipo de motores são uma boa opção; no entanto, estes têm baixa eficiência, não possuem feedback e possuem momento da força limitado em altas velocidades.

#### 3.4.1.1 Momento da força dos Motores

Este tipo de motores transfer o momento da força num eixo para superar a resistência ao movimento, em torno do eixo de rotação, dos elos subsequentes. Esta resistência pode ocorrer devido à gravidade e aos efeitos da inércia. Para realizar os cálculos, foram feitas as seguintes suposições:

- O peso de cada elo está localizado ao longo do eixo central;
- A carga está distribuída uniformemente em torno do centro;
- O comprimento de cada segmento é medido de um ponto central para o próximo;
- As propriedades reais do material, o momento de inércia e a massa de cada parte são estimadas usando a avaliação de "propriedades de massa" do Fusion360.

Em relação ao efeito da gravidade, há evidências experimentais de que todos os corpos caem com a mesma aceleração em um campo gravitacional uniforme. Devido



ao fato de que todos os corpos na Terra estão sujeitos a esse efeito, cada parte do robô deve ser analisada, considerando que o robô deve ser capaz de superar esse efeito.

O momento da força é definido como a força de rotação e é calculado através da seguinte expressão:

$$\tau_g = F \cdot L$$

Onde:  $\tau_g$  é o momento da força,  $F$  é a força que atua em um ponto do braço e  $L$  é a distância perpendicular entre o ponto de rotação e o ponto de aplicação de  $F$ .

A força  $F$  representa e é definida como:

$$F = m \cdot g$$

Onde:  $F$  é a força que atua em um ponto do braço,  $m$  é a massa e  $g$  é a aceleração gravitacional.

O momento da força resistivo em um eixo devido ao efeito da gravidade depende da posição do robô; portanto, é necessário assumir o pior cenário possível. O momento da força máximo ocorre quando o braço está completamente esticado horizontalmente.

O cálculo do momento da força dos eixos foi feito assumindo uma carga de 500 g na ponta do braço. Para os pesos dos elos, recorreremos à avaliação de "propriedades de massa" do Fusion360; as distâncias também foram avaliadas no Fusion360.

O efeito da inércia é a tendência de um objeto resistir a qualquer tentativa de alteração da sua velocidade de rotação. O momento da força, devido a este efeito, é calculado usando a seguinte equação:

$$\tau_I = I \cdot a$$

Onde:  $\tau_I$  é o momento da força,  $I$  é o momento de inércia e  $a$  é a aceleração angular.

O momento da inércia mede a resistência de um objeto em alterar seu movimento de rotação; neste caso, os valores foram estimados por meio da avaliação de "propriedades de massa" do Fusion360, que utiliza um eixo específico no centro de massa. Como o movimento de rotação é feito em torno do eixo de rotação do eixo, foi necessário calcular os momentos da inércia para estes eixos no centro de massa; isto foi feito utilizando o teorema do eixo paralelo:

$$I = I_{CM} + m \cdot h^2$$

Onde:  $I$  é o momento da inércia em relação ao eixo de rotação,  $I_{CM}$  é o momento da inércia em relação a um eixo que passa pelo centro de massa,  $m$  é a massa e  $h$  é a distância perpendicular entre os eixos.

O momento da força total necessário em cada eixo será a soma dos dois momentos da força, devido à gravidade e à inércia.

### 3.4.2 Fontes de Alimentação

A fonte de alimentação é responsável por fornecer energia elétrica aos componentes do robô. Para escolher corretamente, é necessário calcular a potência de cada componente e a corrente necessária. Em Portugal, a tensão padrão para redes elétricas é de 220 V; portanto, a fonte de alimentação precisa de conseguir converter 220 VCA para 6/12 VCC, que foi a nossa escolha para a tensão de saída da fonte de alimentação.

A potência necessária é calculada utilizando a seguinte equação:

$$P = V \cdot I$$

Onde:  $P$  é a potência,  $V$  é a tensão e  $I$  é a corrente.

## **3.5 Resumo**

Este capítulo descreve o processo utilizado para escolher o projeto base para o redesenho do protótipo e o próprio redesenho para atender aos requisitos e restrições. A validação e escolha dos componentes que fornecem o movimento também foram realizadas.

# Capítulo 4

## Controlo de Movimento

Neste capítulo, o movimento do protótipo é analisado. Bem como o modelo cinemático e dinâmico, assim como o controlo e a eletrónica.

### 4.1 Cinemática

#### 4.1.1 Cinemática Direta

A cinemática é a área da física que estuda o movimento dos corpos sem levar em consideração a origem do movimento. O estudo da cinemática de um braço envolve, entre outras coisas, as posições dos diferentes sistemas de coordenadas que mudam à medida que o braço se articula. Seguindo um método para calcular a posição e a orientação da ponta do braço do manipulador em relação à sua base. Geralmente, os sistemas de coordenadas podem ser definidos arbitrariamente, desde que estejam ligados ao elo a que se referem. No entanto, é conveniente seguir algumas regras para a definição dos sistemas de coordenadas dos elos.

##### 4.1.1.1 Notação de Denavit-Hartenberg

A notação Denavit- Hartenberg é o método sistemático mais comum para descrever a geometria e a cinemática dos mecanismos constituídos por ligações em série,

como manipuladores robóticos. Esta notação fornece uma maneira padronizada de atribuir "frames" de coordenadas a cada elo e eixo do respetivo manipulador, facilitando assim, a análise e a modelagem matemática do sistema. A relação entre dois sistemas de coordenadas possui seis parâmetros, três de translação e três de rotação. No entanto, com a notação de Denavit-Hartenberg, é possível usar apenas quatro parâmetros devido às posições dos sistemas de coordenadas. A primeira regra é que o eixo  $x$  do sistema de coordenadas  $i$  deve intercetar o eixo  $z$  do sistema de coordenadas  $i - 1$ . A segunda restrição é que o eixo  $x$  do sistema de coordenadas  $i$  é perpendicular ao eixo  $z$  do sistema de coordenadas  $i - 1$ .

Com relação à notação Denavit-Hartenberg padrão, um manipulador com  $N$  eixos (numerados de 1 a  $N$ ) possui  $N + 1$  elos (numerados de 0 a  $N$ ), sendo 0 a base e  $N$  a ponta do braço. O eixo  $i$  conecta o elo  $i - 1$  ao elo  $i$ , portanto, o eixo  $i$  movimenta o elo  $i$ . Como mencionado anteriormente, um elo pode ser definido por dois parâmetros: o seu comprimento  $a_i$  e a tensão que ocorre quando é aplicado momento sobre o eixo  $\alpha_i$ . Os eixos também podem ser definidas por dois parâmetros: o deslocamento do elo  $d_i$ , que é a distância entre um sistema de coordenadas do elo ao próximo ao longo do eixo, e o ângulo que o motor é capaz de fazer  $\theta_i$ , que é a rotação de um sistema de coordenadas do elo em relação ao próximo ao longo do eixo.

$\theta_i$ (°)	The angle between $x_{i-1}$ and $x_i$ axes about the $z_{i-1}$ axis
$d_i$ (mm)	The distance from the origin of frame $i - 1$ to the $x_i$ and $z_{i-1}$ axis interception along the $z_{i-1}$ axis
$a_i$ (mm)	The distance from $z_{i-1}$ and $x_i$ axis interception to the frame $i$ origin along $x_i$ axis
$\alpha_i$ (°)	The angle from $z_{i-1}$ axis to $z_i$ axis about $x_i$ axis

Figure 4.1: Parâmetros de Denavit-Hartenberg

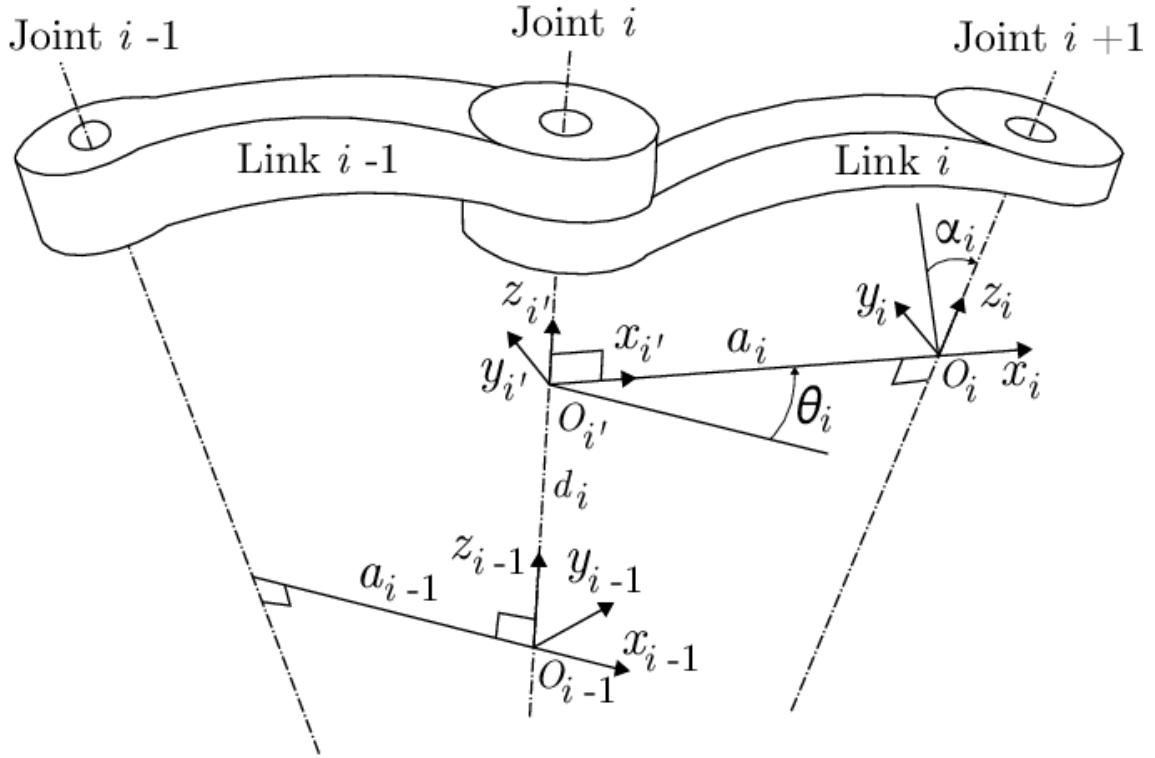


Figure 4.2: Ligações dos Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Como mostrado na Figura 4.2, o sistema de coordenadas  $i$  está fixado na extremidade mais distante do elo e o eixo  $i$  está alinhado com o eixo  $z$ . Estes elos e parâmetros do eixo são conhecidos como parâmetros de Denavit-Hartenberg.

A transformação do sistema de coordenadas do elo  $i - 1$  para o sistema de coordenadas do elo  $i$  é definida em termos de rotações e translações como  ${}^{i-1}A_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = T_R Z(\theta_i) T_Z(d_i) T_X(a_i) T_R X(\alpha_i)$ ; podendo ser expandidas em:

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para um manipulador de cadeia aberta com  $i + 1$  elos e  $i$  eixos, onde o elo 0 é a base fixa ao solo, assume-se que cada eixo fornece um grau de liberdade à estrutura, correspondente à variável do eixo.

A construção de um procedimento operacional para o cálculo da cinemática direta deriva naturalmente da estrutura típica de cadeia cinemática aberta do manipulador. Uma vez que cada eixo conecta dois elos consecutivos, é razoável considerar primeiro a descrição da relação cinemática entre elos consecutivos e, em seguida, obter a descrição geral da cinemática do manipulador de forma recursiva. Para isso, vale a pena definir um sistema de coordenadas anexado a cada elo, do elo 0 ao elo  $N$ . Em seguida, a transformação de coordenadas que descreve a posição e orientação do sistema de coordenadas  $N$  em relação ao sistema de coordenadas 0 é dada por:

$$T_N^0(q) = A_1^0(q_1)A_2^1(q_2)\dots A_N^{N-1}(q_N)$$

O cálculo da função da cinemática direta é recursivo e obtido de maneira sistemática, por meio de produtos simples das matrizes de transformação homogênea  $A_i^{i-1}(q_i)$  (para  $i = 1, \dots, N$ ), cada uma das quais é uma função de uma única variável de um eixo.

Com referência à equação de cinemática direta, a transformação de coordenadas real que descreve a posição e orientação do sistema de coordenadas da parte final do braço em relação ao sistema de coordenadas da base pode ser obtida da seguinte forma:

$$T_e^b(q) = T_0^b T_0^N(q) T_e^N$$

Onde:  $T_0^b$  é a posição e orientação do sistema de coordenadas 0 em relação ao sistema de coordenadas da base e  $T_e^N$  a posição e orientação do sistema de coordenadas da ponta final do braço em relação ao sistema de coordenadas do elo  $N$ .

#### 4.1.1.2 Parâmetros do Protótipo segundo a Notação Denavit-Hartenberg

Conforme mencionado anteriormente, para desenvolver e controlar adequadamente um manipulador robótico, é importante determinar os parâmetros de Denavit-

Hartenberg. O primeiro passo para isto é realizar uma atribuição correta dos sistemas de coordenadas. A atribuição dos sistemas de coordenadas para o protótipo é representada na Figura 4.3. O processo de atribuição dos sistemas de coordenadas foi o seguinte:

- Estabelecer o sistema de coordenadas da base. Definir a origem na base do suporte, o eixo  $z_0$  coincidente com o eixo de rotação 1. Os eixos  $x_0$  e  $y_0$  são escolhidos convenientemente para formar um sistema de coordenadas tridimensional.
- Estabelecer os eixos dos eixos de rotação. O eixo  $z_1$  coincide com o eixo de rotação  $i + 1$ .
- Estabelecer a origem do sistema de coordenadas  $i$ . A origem do sistema de coordenadas  $i$  está na interseção entre o eixo  $z_j$  e o eixo  $z_{i-1}$ . Se os eixos  $z_i$  e  $z_{i-1}$  forem paralelos, a origem está na interseção do eixo  $z_i$  e a reta normal comum aos eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$ .
- Estabelecer o eixo  $x_i$  ao longo da reta normal comum entre  $z_{i-1}$  e  $z_i$ , passando por  $O_i$ .
- Estabelecer o eixo  $y_i$  para completar um sistema de coordenadas tridimensional.
- Estabelecer o sistema de coordenadas da parte final do braço. Estabelecer o eixo  $x_i$  de forma a que este seja perpendicular a  $z_{i-1}$ .
- Repetir estes passos para cada sistema de coordenadas.



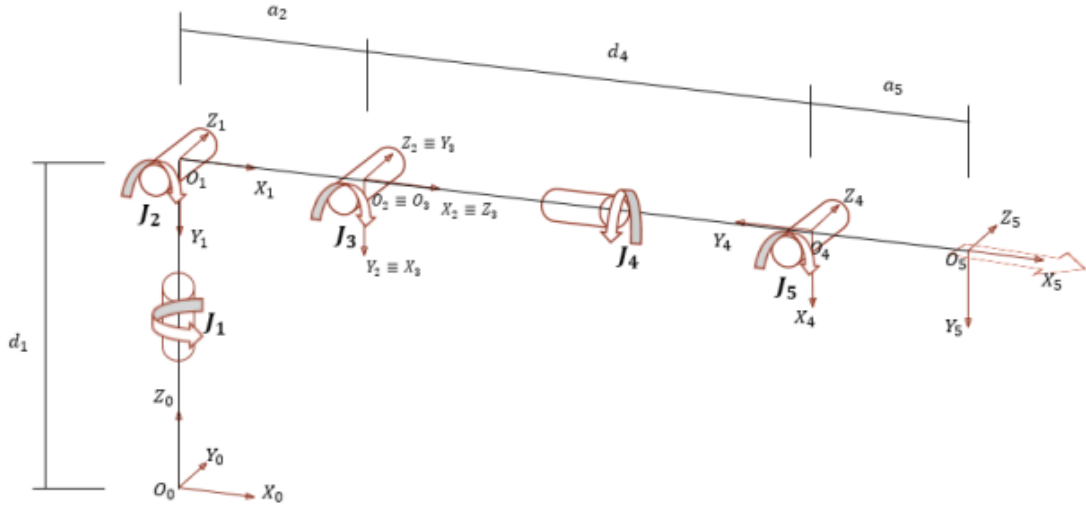


Figure 4.3: Sistemas de Coordenadas atribuídas ao Protótipo

### 4.1.2 Cinemática Inversa

Após resolvermos o problema da cinemática direta, é necessário trabalhar no problema da cinemática inversa, ou seja, determinar as variáveis dos eixos de rotação correspondentes a uma dada posição e orientação da parte final do braço. A solução deste problema é crucial para transformar as especificações do movimento atribuídas à parte final do braço no espaço operacional em movimentos correspondentes no espaço dos eixos de rotação que permitem a execução do movimento necessário.

Em relação à cinemática direta, uma vez que as variáveis dos eixos de rotação são conhecidos, a posição da parte final do braço e a matriz de rotação são calculadas de forma unificada. Por outro lado, o problema da cinemática inversa é mais elaborado devido aos seguintes motivos:

- As equações a serem resolvidas são, em geral, não lineares, portanto, nem sempre é possível encontrar uma solução analítica.
- Pode haver múltiplas soluções.
- Pode haver um número infinito de soluções, por exemplo, no caso de um manipulador redundante.

- Pode não haver soluções admissíveis, considerando a estrutura cinemática do manipulador.
- A única maneira de garantir uma solução é se a posição e orientação dadas do efetuador final pertencerem ao espaço de trabalho hábil do manipulador.

Em relação ao problema de múltiplas soluções, isto depende não apenas do número de graus de liberdade, mas também do número de parâmetros de Denavit-Hartenberg diferentes de zero; geralmente, quanto maior o número de parâmetros não nulos, maior o número de soluções admissíveis. Esta ocorrência exige algum critério para escolher entre as soluções admissíveis. A existência de limites mecânicos nos eixos de rotação pode eventualmente reduzir o número de soluções múltiplas admissíveis para a estrutura real.

O cálculo de soluções analíticas requer, ou uma intuição algébrica para encontrar as equações significativas que contem as incógnitas, ou uma intuição geométrica para encontrar os pontos significativos na estrutura, em relação aos quais é conveniente expressar a posição e/ou orientação como função de um número reduzido de incógnitas. Se encontrar uma solução analítica é difícil, pode ser apropriado recorrer a técnicas de solução numérica; estas têm a vantagem de serem aplicáveis a qualquer estrutura cinemática, mas geralmente não permitem o cálculo de todas as soluções admissíveis.

### 4.1.3 Cinemática Diferencial

A cinemática diferencial é tem como objetivo encontrar a relação existente entre as velocidades dos eixos e as velocidades lineares e angulares correspondentes do efetuador final. De acordo com a configuração do manipulador a matriz, denominada de "Geometric Jacobian" descreve esse mesmo mapeamento. A "Jacobian Matrix" pode ser calculada através da diferenciação da cinemática direta em relação às variáveis dos eixos, este cálculo só é possível se a pose do efetuador final for expressa em relação a uma representação mínima no espaço operacional. A "Jacobian"

resultante, denominada "Analysis Jacobian" em geral difere em diversos aspetos da "Geometric Jacobian". A "Jacobian" é de facto uma das ferramentas mais importantes para a caracterização do manipulador; também mostra ser bastante útil para encontrar singularidades, para analisar redundâncias, determinar algoritmos de cinemática inversa, descrever o mapeamento entre as forças aplicadas ao efetuador final e os momentos da força resultantes dos eixos, derivar equações dinâmicas de movimento e projeção de esquemas de controle no espaço operacional.

$$v_e = J(q)\dot{q}$$

Onde:  $v_e$  é a velocidade Cartesiana,  $J(q)$  a velocidade de "Jacobian" e  $\dot{q}$  a velocidade do eixo de rotação.

## 4.2 Modelo Dinâmico

Anteriormente, apenas estudámos posições estáticas, forças estáticas e velocidades. No entanto isto não é aplicável ao mundo real e por isso precisamos de ter em consideração as forças necessárias para causar o movimento. Os modelos dinâmicos descrevem esta relação necessária. Para conseguirmos fazer este estudo precisamos de simular o manipulador de movimento de modo a que consigamos obter estratégias de movimento e técnicas de planeamento do mesmo que possam ser testadas sem que seja preciso um modelo físico do sistema em estudo.

Existem diversos métodos de gerar equações do modelo dinâmico. Como recurso podemos usar a formulação de Lagrange, que acaba por ser um conceito simples. Outro método é a formulação de Newton-Euler, que é computacionalmente mais eficaz, uma vez que explora abertamente a estrutura de cadeia de um modelo cinemático. Ambas as formulações permitem a computação da relação entre os momentos das forças articulares e o movimento da estrutura. As vantagens da formulação de Lagrange são as seguintes:

- É de fácil compreensão e sistemático.

- Fornece as equações do movimento de forma analítica e compacta, contendo a matriz da inércia, a matriz das forças centrífugas e de Coriolis, e o vetor das forças gravitacionais. Desta forma é vantajosa para o design do controle.
- É efetivo se desejarmos incluir efeitos mecânicos com maior complexidade, como a deformação flexível dos elos.

As vantagens da formulação de Newton-Euler são as seguintes:

- Trata-se de um método inerentemente recursivo que é computacionalmente eficiente.

No que diz respeito à dinâmica de um manipulador, é importante encontrar uma solução para os dois tipos de problemas: o cálculo da dinâmica direta e o cálculo da dinâmica inversa.

## 4.3 Controlo

### 4.3.1 Eletrónica

#### 4.3.1.1 Montagem da Eletrónica

A Figura abaixo apresenta o esquema dos componentes eletrónicos e das ligações. Para a interface entre o controlador Arduino Uno R3 e os motores.

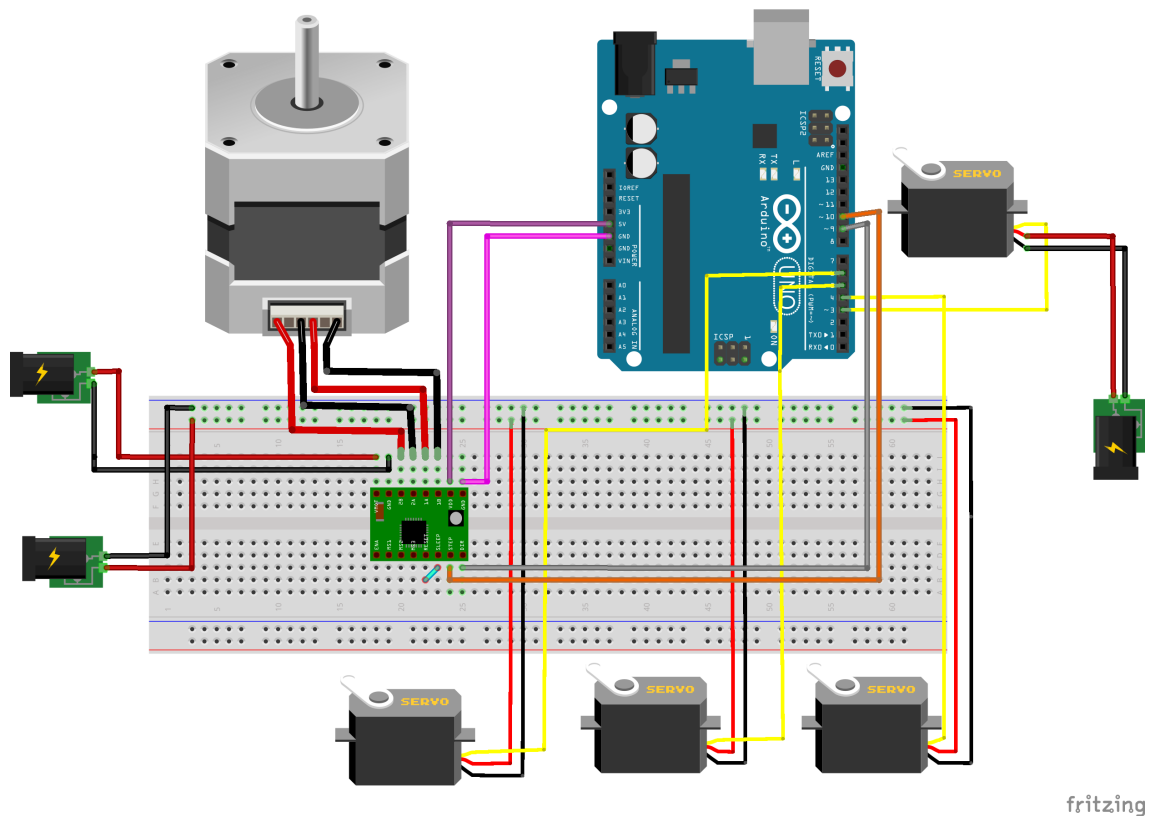


Figure 4.4: Circuito Eletrónico

#### 4.3.1.2 Firmware

Uma firmware é um software de computador que controla os motores do protótipo e é instalado no Arduino Uno R3. O código criado possibilita o controlo de cada motor através do Serial Monitor disponível na aplicação Arduino IDE que possibilita o controlo de cada motor para um determinado ângulo apenas à distância de um "click".

## 4.4 Resumo

O desenvolvimento do modelo cinemático e dinâmico permitiram uma melhor compreensão do movimento e das restrições físicas do protótipo. A implementação elétrica e de controlo permitirá testar cada motor antes da montagem.

# Capítulo 5

## Implementação

Este capítulo aborda a implementação e produção do protótipo desenvolvido. Também são abordados os testes pré-montagem e pós-montagem do protótipo, bem como possíveis melhorias.

### 5.1 Impressão 3D

Um dos aspectos mais importantes a ser considerado ao construir um protótipo de um robô é a impressão 3D das peças projetadas; isto permite manter um baixo custo e um tempo de produção mais rápido. Houve dois critérios em relação à escolha da tecnologia e do material: os equipamentos disponíveis para realizar essa tarefa e as propriedades mecânicas desejadas. Para imprimir as peças, foi utilizada uma tecnologia, FDM.

#### 5.1.1 FDM

As demais peças impressas foram fabricadas na impressora Ender3 Max Neo através do uso da tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). Esta é uma das formas mais amplamente utilizadas de impressão 3D ao nível do consumidor. As impressoras 3D de FDM constroem as peças, expelindo o filamento termoplástico (PLA) a uma velocidade constante, derretendo-o em seguida devido

ao bico aquecido, aproximadamente  $215^{\circ}\text{C}$ . O bico deposita cada camada na cama aquecida que permite uma maior adesão.

## 5.2 Montagem e Testes

A montagem do robô foi dividida em diferentes fases para permitir uma maior organização do projeto. Antes de montar o braço robótico, a parte elétrica e os motores foram todos testados. A sequência de montagem e teste foi a seguinte:

- Montagem dos componentes elétricos (Arduino Uno R3, Driver A4988, fontes de alimentação e motores);
- Teste da parte elétrica montada;

## 5.3 Desempenho

Algumas das características mais importantes para avaliar o desempenho do robô são:

- Repetibilidade: a capacidade do robô de retornar a um ponto onde se encontrava previamente;
- Precisão: diferença entre a posição alcançada (posição real) e a posição desejada; essa característica está relacionada com a resolução;
- Amplitude: quantos graus o eixo pode girar sem colisão;
- Distância alcançável: a distância que o braço robótico pode alcançar em diferentes posições; essa característica, juntamente com o número e tipo de eixos, fornece informações valiosas sobre o espaço de trabalho.

## 5.4 Resumo

A comparação feita entre os desenhos e as peças impressas mostrou algumas dissimilaridades dimensionais inerentes ao processo. Os testes de pré-montagem elétrica permitiram a deteção de alguns problemas, que serão mais fáceis de corrigir nesta fase da montagem.



# Capítulo 6

## Conclusões e Desenvolvimento Futuro

### 6.1 Conclusões Finais

A um nível pessoal, o mês e meio no qual este projeto foi desenvolvido foi de constante aprendizagem. A possibilidade de compreender os problemas que engenheiros robóticos enfrentam no dia a dia foi de grande valor.

O projeto foi desafiador. O objetivo inicial de projetar e validar um protótipo de um braço robótico com cinco graus de liberdade foi alcançado.

A utilização de um projeto de código aberto como base para iniciar o desenvolvimento foi uma decisão importante para ser mais eficiente, considerando o tempo disponível. O projeto do braço robótico permitiu a possibilidade de testar, em um ambiente virtual, possíveis restrições e alterações que precisavam ser feitas, além de verificar se os componentes disponíveis eram dimensionalmente adequados.

Os componentes precisaram de ser validados a nível dimensional, mas também quanto ao seu nível de desempenho. Cálculos matemáticos tiveram de ser realizados devido às necessidades mecânicas e elétricas, de forma a verificar se estes eram capazes de realizar a tarefa requerida. Estes cálculos foram todos feitos considerando o pior cenário possível.

O design eletrónico para este protótipo deu a capacidade desejada aos componentes em relação a algumas características de desempenho. O robô pode atingir as posições desejadas e possui a estabilidade necessária, devido à capacidade dos motores de manter uma posição fixa.

O uso de impressoras 3D de alta qualidade permitiu a produção de peças com boas propriedades mecânicas e esteticamente atrativas. As peças impressas precisaram de alguns ajustes dimensionais, o que é normal neste processo. A facilidade de integração dos desenhos com o software da impressora 3D é uma vantagem em termos de economia de tempo.

## 6.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

Devido à falta de tempo, não foi possível codificar uma aplicação para controlo de cada motor individualizado de uma forma mais "user friendly". Contudo, o robô desenvolvido neste projeto é um protótipo, portanto, existe sempre espaço para melhorias. Estas são algumas alterações que poderiam melhorar o robô:

- Remodlagem e reimpressão de peças: alguns componentes usados neste protótipo desgastaram-se, principalmente os componentes mecânicos que foram impressos em 3D. Portanto, uma primeira melhoria é substituir as peças que se desgastarão por peças em materiais mais resistentes.
- Interface LabVIEW: criar um aplicativo de interface no LabVIEW para manipular o protótipo.
- Utilizar potenciômetros externos: os motores utilizados neste protótipo foram motores com potenciômetros de baixo nível, o que os torna mais económicos, mas caso ocorra uma interferência, o robô não alcançará a posição desejada. Isto permitirá um maior controlo e precisão do posicionamento do robô.

### **6.3 Comentário Crítico à contextualização do objeto de estudo por parte do ChatGPT**

A contextualização do objeto de estudo feita pelo ChatGPT aborda de maneira adequada a importância da aplicação de conceitos físicos no desenvolvimento e funcionamento de um braço robótico. A compreensão e o controle dos movimentos, forças e interações desses sistemas mecatrônicos avançados são fundamentais, e os conceitos físicos desempenham um papel crucial nesse contexto.

A menção à cinemática como um dos principais conceitos físicos aplicados ao braço robótico é relevante, pois permite determinar com precisão as posições, velocidades e acelerações das articulações, possibilitando o planejamento de trajetórias suaves e precisas. Além disso, a consideração da dinâmica, que analisa as forças e momentos atuantes, contribui para a compreensão das interações entre as articulações, bem como para a manipulação de objetos e o equilíbrio do sistema.

No controle do braço robótico, os controladores baseados em feedback de sensores são destacados como uma ferramenta para ajustar as forças e posições das articulações, resultando em movimentos mais precisos e suaves. O uso de técnicas avançadas de controle, como o controle por realimentação de estado, também é mencionado como uma forma de otimizar o desempenho do sistema.

A contextualização também destaca as aplicações benéficas da robótica em diversos setores, como saúde, indústria, exploração espacial e proteção ambiental. O potencial da robótica para melhorar a qualidade de vida, impulsionar a eficiência produtiva e enfrentar desafios complexos é ressaltado, evidenciando a importância de utilizar essa tecnologia para o bem-estar e o progresso da humanidade.

Apesar da abordagem abrangente, seria interessante uma análise mais crítica, discutindo as limitações e desafios da aplicação dos conceitos físicos, assim como as possíveis implicações sociais, éticas e econômicas da ampla adoção da robótica. Questões como desigualdade de acesso, impacto no mercado de trabalho e consequências imprevistas merecem reflexão para uma análise mais completa.

Em síntese, a contextualização apresentada pelo ChatGPT oferece uma visão geral adequada da importância dos conceitos físicos na compreensão e no desenvolvimento de braços robóticos. No entanto, uma abordagem crítica mais aprofundada poderia enriquecer a discussão, explorando desafios, limitações e implicações mais amplas relacionadas à robótica.

# Bibliografia

- [1] João Pedro Marques Antunes. Torque vectoring for a formula student prototype. 2017.
- [2] Elias Brassitos. Inverse kinematics of 6 axes robots.
- [3] Eben Kouao. Diy arduino robot arm - controlled by hand gestures — full tutorial.
- [4] Paulo Leite Machado. Robotic arm with base force/torque sensing towards underwatermanipulation. 2019.
- [5] Miguel Pereira Mendes. Computed torque-control of the kinova jaco arm. 2017.
- [6] Northwestern Robotics. Modern robotics, chapter 8.1: Lagrangian formulation of dynamics (part 1 of 2).
- [7] Ricardo Miguel Carvalho Santos. Design and validation of a five degrees of freedom robotic arm prototype for car industry test application. pages 1–93, 2018.
- [8] Angela Sodemann. Robotics 2 u1 (kinematics) s5 (inverse kinematics) p2 (procedure and programming).
- [9] Jelle Vermandere. I made a robot arm... in the middle of my room!