



**Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia**

**Robô cobra multimodular:  
construção, controle e movimentação**

Thiago de Deus Lima Rocha

PROJETO FINAL DE CURSO  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Brasília  
2023

**Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia**

**Robô cobra multimodular:  
construção, controle e movimentação**

Thiago de Deus Lima Rocha

Projeto Final de Curso submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação

Orientadora: Profa. Dra. Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike

Coorientadora: Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana

Brasília

2023

R672r Rocha, Thiago de Deus Lima.  
Robô cobra multimodular: construção, controle e movimentação / Thiago de Deus Lima Rocha; orientadora Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike; coorientadora Dianne Magalhães Viana. -- Brasília, 2023.  
102 p.

Projeto Final de Curso (Engenharia de Controle e Automação)  
-- Universidade de Brasília, 2023.

1. Robótica bioinspirada. 2. Robótica modular. 3. Manufatura Aditiva. I. Koike, Carla Maria Chagas e Cavalcante, orient. II. Viana, Dianne Magalhães, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia**

**Robô cobra multimodular:  
construção, controle e movimentação**

Thiago de Deus Lima Rocha

Projeto Final de Curso submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação

Trabalho aprovado. Brasília, 26 de dezembro de 2023:

---

**Profa. Dra. Carla Maria Chagas e  
Cavalcante Koike, UnB/IE/CIC**  
Orientadora

---

**Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana,  
UnB/FT/ENM**  
Coorientadora

---

**Prof. Dr. Marcus Vinícius Lamar,  
UnB/IE/CIC**  
Examinador interno

---

**Prof. Dr. Flávio de Barros Vidal,  
UnB/IE/CIC**  
Examinador interno

Brasília  
2023

*Este trabalho é dedicado à todas as pessoas que,  
por meio da Ciência, agem para fornecer dignidade à condição humana.*

# Agradecimentos

De início eu agradeço a Deus, que mesmo em todo o seu mistério e grandeza além da minha compreensão, age e agiu sobre mim durante minha vida me motivando e me protegendo. Independentemente de sua forma ou de seu nome, tenho consciência da minha fugaz e insignificante existência e sei que só estou vivo e pensante hoje porque algo maior me segurou nos momentos difíceis.

Agradeço também à minha família, desde os primeiros antepassados cujos nomes desconheço, até os meus parentes mais próximos física e temporalmente. Em especial, agradeço aos antepassados que, mesmo diante de toda a dureza da vida, não desistiram de tentar fornecer o melhor disponível para seus filhos e filhas. Sua presença é viva em meu sangue e em minhas memórias. De maneira especial, mas sem citar nomes, agradeço a minha bisavó mais próxima pelo carinho constante e pela compreensão. Agradeço também aos meus avós maternos e paternos por todos os momentos compartilhados na infância, na adolescência e também na vida adulta. Sou muito grato por todas as guloseimas, aventuras e histórias que me foram contadas, assim como por todos os incontáveis bons momentos compartilhados. Agradeço também aos meus tios e tias que tanto me ajudaram ao longo da minha vida. Apesar de brigarmos bastante, não nos deixamos de amar. Agradeço também aos meus primos queridos com quem já compartilhei incríveis momentos de diversão. Sou muito grato de poder participar de suas vidas e de ter vocês na minha. Obrigado por me tolerarem quando eu estou insuportável. Por último, agradeço a meus pais. Para eles, qualquer combinação de palavras é absolutamente insuficiente. Todavia, para quem nunca havia tido filhos, eu diria que vocês têm talento nato para a tarefa. Obrigado por me apoiarem, mesmo quando eu já havia desistido de mim mesmo. Obrigado por me alimentarem, obrigado por me fornecerem abrigo, conforto e escuta. Obrigado especialmente por me oferecerem em abundância, aquilo que move e alimenta as almas humanas: o amor.

Agradeço também o apoio profissional fornecido pela minha orientadora Professora Doutora Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, assim como pela minha coorientadora Professora Doutora Dianne Magalhães Viana que impediram que eu me tornasse o meu maior inimigo academicamente. Agradeço também a toda a equipe do grupo *Ereko* sem a qual eu não teria tido contato real com o projeto de mecanismos e manufatura aditiva, tão importantes para a conclusão do meu trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas que fiz durante a minha trajetória no curso. De maneira especial, agradeço a Carlos e Giu pela ajuda nas matérias de computação, especialmente nos primeiros semestres onde sofri tanto. Agradeço também à Sarah por ter me ajudado a me encontrar dentro das estruturas de poder e dados do curso. Agradeço ao Matheus e ao Thiago

pela ajuda com o *LaTeX*. Agradeço também a todos os meus amigos de curso: Ana Clara, Eraldo, Lara, Lucas, Alexandre, Brayan, Davi, Laura, Julia, Eraldo, Vic, Álvaro, Hannah, Gabs, Mari, Arcoverde, Leandro, França, Paulo, Matheus, Eduardo, Eric, Andressa, Adriano, Barba, Léo, Francis, Heli, Maria, Bulba, Tauana e todos os outros que eu não citei, mas que convivem comigo. Espero que em nosso tempo juntos, eu tenha sido uma boa pessoa para com vocês da mesma forma que vocês foram comigo.

Agradeço também a todas as pessoas e paisagens que pude visualizar e com quem pude dançar e me divertir ao longo de minha estadia de 5 anos dentro da Universidade de Brasília. Sentirei falta da sensação de encanto que é se apaixonar diariamente por rostos tão diferentes, da sensação de aprender um passo novo nas aulas de forró dos professores Hérciles e Roberta e de sentir o corpo tremer durante o aquecimento das aulas de Canto Coral com o professor Edson. Respirar os ares da liberdade é definitivamente revigorante.

Por último, agradeço a mim mesmo por não ter desistido da minha vida, tanto profissional quanto em qualquer outro sentido. Os desafios que enfrentei ao longo desses 5 últimos anos foram enormes e extremamente cansativos tanto física quanto mentalmente. Com a ajuda de minha psicóloga, aprendi a seguir em frente e a me culpar menos, especialmente em assuntos relacionados ao meu perfeccionismo e as fantasias irreais nas quais recorrentemente eu me encontrava. Sou grato a mim mesmo e tenho orgulho por ter continuado e feito, nos momentos em que era necessário, o que precisava ser feito.

# Resumo

A utilização de robôs apodais bioinspirados em cobras para situações de busca e resgate é atualmente uma área fortemente ativa de pesquisa, especialmente quando se considera sua aplicação em ambientes de difícil locomoção, com escombros ou dimensões reduzidas, onde outros tipos de robôs móveis mais convencionais não apresentam desempenho adequado. Com o objetivo de desenvolver um protótipo de robô cobra como parte inicial de um projeto mais amplo de desenvolvimento e controle de mecanismos modulares e de algoritmos focados em busca e resgate, o presente trabalho aborda as etapas de construção do protótipo por meio de 3 eixos temáticos principais: o Projeto Mecânico; o Projeto Elétrico e Eletrônico e o Projeto de Controle Computacional. No Projeto Mecânico, três propostas de módulos são comparadas entre si e com outros modelos previamente desenvolvidos na Universidade de Brasília, com base em critérios como: viabilidade geométrica das conexões, proteção dos circuitos e dos componentes internos de cada módulo, viabilidade mecânica de movimentação do conjunto. No Projeto Elétrico e Eletrônico, são comparadas outras três estratégias de alimentação dos componentes internos: uma descentralizada via baterias e duas por meio de cabeamento físico entre cada um dos módulos. Os critérios usados na comparação são a facilidade de implementação, o custo monetário envolvido e a minimização da massa e dos esforços mecânicos envolvidos. No Projeto de Controle Computacional, por meio de um controlador único centralizado, uma estratégia de controle de juntas em regime permanente por meio de osciladores senoidais é implementada. Para verificar o funcionamento dessa estratégia, cada um dos atuadores é calibrado. Após a montagem e verificação de funcionamento global do protótipo, estuda-se via um conjunto finito de amostras o efeito da variação dos parâmetros de controle dos osciladores senoidais sobre a trajetória do protótipo em um plano horizontal. Para o conjunto de parâmetros escolhidos, sua variação gerou efeito de deslocamento não nulo sobre o protótipo.

**Palavras-chave:** Robótica bioinspirada. Robótica modular. Manufatura Aditiva.

# Abstract

The use of bioinspired apodal robots for search and rescue missions is currently a highly active research area, particularly in challenging environments with debris or limited dimensions where conventional mobile robots may not perform adequately. In an effort to develop a prototype snake robot as the initial phase of a broader project focusing on the development and control of modular mechanisms and algorithms for search and rescue, this work addresses three main thematic axes: Mechanical Design, Electrical and Electronic Design, and Computational Control Design. In the Mechanical Design phase, three module proposals are compared among themselves and with other models previously developed at the University of Brasília. Evaluation criteria include geometric feasibility of connections, protection of circuits and internal components in each module, and mechanical feasibility of the overall movement. In the Electrical and Electronic Design phase, three internal component power supply strategies are compared: a decentralized approach using batteries and two using physical wiring between each module. Criteria for comparison include ease of implementation, associated monetary cost, and minimization of mass and mechanical efforts. In the Computational Control Design phase, a centralized single controller is used to implement a steady-state joint control strategy using sinusoidal oscillators. To assess the functionality of this strategy, each actuator is calibrated. After the assembly and overall functionality verification of the prototype, the effect of varying parameters of the sinusoidal oscillators on the prototype's trajectory in a horizontal plane is studied using a finite set of parameter samples. For the chosen parameter set, their variation resulted in a non-zero displacement effect on the prototype.

**Keywords:** Bio-inspired Robotics. Modular robotics. 3D printing.

# Lista de ilustrações

Figura 1.1	Ambiente com escombros. . . . .	15
Figura 1.2	Vista superior de aplicação típica de robôs redundantes. . . . .	16
Figura 2.3	Descrições cinemáticas de um robô modular. . . . .	21
Figura 2.4	Descrição RPY, cabeça, cauda e eixos XYZ para um robô ápole. . . . .	23
Figura 2.5	Centro de massa para um robô articulado. . . . .	24
Figura 2.6	Deslocamentos para um robô ápole. . . . .	24
Figura 2.7	Descrição geométrica da curva serpenoide discreta. . . . .	33
Figura 2.8	Robô de alteração de atrito anisotrópico ativo. . . . .	35
Figura 2.9	Robô e sua textura induzida via manufatura. . . . .	36
Figura 2.10	Robô como superfície baseada em <i>Kirigami</i> . . . . .	37
Figura 2.11	Robô com superfície ciliar anisotrópica de atrito. . . . .	38
Figura 2.12	Vistas do Erekebot $\beta$ . . . . .	39
Figura 2.13	Vistas do Erekebot $\alpha$ e $\beta$ . . . . .	40
Figura 2.14	Vistas do Erekebot $\sigma$ . . . . .	41
Figura 2.15	Vistas do Erekebot <i>VDM</i> . . . . .	42
Figura 3.16	Montagem eletrônica centralizada na placa PCA 9685. . . . .	48
Figura 3.17	Primeira implementação da alternativa 2. . . . .	50
Figura 3.18	Segunda implementação da alternativa 2. . . . .	50
Figura 3.19	Aparato de calibração dos motores. . . . .	53
Figura 4.20	Duas versões da primeira proposta de módulo para o mecanismo final. . . . .	56
Figura 4.21	Vistas Isométrica e Lateral da primeira proposta de robô modular. . . . .	56
Figura 4.22	Segunda proposta de módulo para o protótipo final. . . . .	57
Figura 4.23	Segunda proposta de módulo para o protótipo final. . . . .	58
Figura 4.24	Vista lateral do robô construído a partir do 2º módulo. . . . .	59
Figura 4.25	Vistas principais do robô modelo. . . . .	60
Figura 4.26	Montagem final do robô modelo. . . . .	61
Figura 4.27	Terceira proposta de módulo para o protótipo final. . . . .	62
Figura 4.28	Vistas principais do 3º módulo. . . . .	62
Figura 4.29	Segunda parte das vistas principais do 3º módulo. . . . .	63
Figura 4.30	Montagem final do 3º robô modular e onda circular. . . . .	66
Figura 4.31	Curvas Horizontal e Vertical para o 3º robô. . . . .	66
Figura 4.32	Possibilidade de subir escadas do robô proposto. . . . .	67
Figura 4.33	Possibilidades de alteração de atrito superficial no robô. . . . .	67
Figura 4.34	Vista lateral do robô para validação de torques. . . . .	70
Figura 4.35	Montagem teórica do esquema elétrico. . . . .	73
Figura 4.36	Montagem teórica do esquema elétrico. . . . .	74

Figura 4.37	Montagem do esquema elétrico. . . . .	75
Figura 4.38	Montagem do esquema elétrico para a fonte. . . . .	75
Figura 4.39	Diagrama do circuito utilizado no projeto. . . . .	77
Figura 4.40	Passos de movimentação para o 1º movimento filmado. . . . .	85
Figura 4.41	Passos de movimentação para o 2º movimento filmado. . . . .	87
Figura 4.42	Passos de movimentação para o 3º movimento filmado. . . . .	88
Figura 4.43	Passos de movimentação para o 4º movimento filmado. . . . .	89
Figura 4.44	Passos de movimentação para o 5º movimento filmado. . . . .	90

# Lista de tabelas

Tabela 2.1	Resumo da relação entre espaço de controle e tipo de movimento utilizado.	34
Tabela 3.2	Quadro com resumo de dados para os servomotores considerados . . .	45
Tabela 4.3	Variáveis de interesse para o cálculo de torque nos motores. . . . .	70
Tabela 4.4	Preços estimados dos componentes elétricos e eletrônicos para o projeto.	71
Tabela 4.5	Mapeamento teórico do servomotor MG 995 entre largura de pulso PWM e ângulo final. . . . .	78
Tabela 4.6	Testes de repetibilidade e ângulo máximo para cada um dos motores. . .	79
Tabela 4.7	Efeito da variação de $\alpha_h$ para o movimento <i>yaw-yaw</i> com $k_h = 2$ fixo. . .	92
Tabela 4.8	Efeito da variação de $k_h$ para o movimento <i>yaw-yaw</i> com $\alpha_h = 2$ fixo em $30^\circ$ . . . . .	92
Tabela 4.9	Efeito da variação de $\alpha_v$ para o movimento <i>pitch-pitch</i> com $k_v = 3$ fixo. .	93
Tabela 4.10	Efeito da variação de $k_v$ para o movimento <i>pitch-pitch</i> com $\alpha_v = 45$ fixo.	93
Tabela 4.11	Efeito da variação de $\alpha$ para o movimento <i>pitch-yaw</i> com $\beta = 30^\circ$ e $k_v = k_h = 3$ . . . . .	94
Tabela 4.12	Efeito da variação de $k$ para o movimento <i>pitch-yaw</i> com $\beta = 30^\circ$ e $\alpha = 15^\circ$ .	95
Tabela 4.13	Efeito da variação de $\beta$ para o movimento <i>pitch-yaw</i> com $k = 3$ e $\alpha = 15^\circ$ .	95

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Contexto e Justificativa	14
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
<b>2</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>20</b>
2.1	Definições iniciais	20
2.2	Controle de juntas por geradores senoidais	23
2.2.1	Controle de módulos <i>pitch-yaw</i>	26
2.2.2	Modelo matemático	28
2.3	Anisotropia de Atrito	34
2.3.1	Mecanismo ativo de alteração do coeficiente de atrito frontal	35
2.3.2	Superfície rígida texturizada	35
2.3.3	Superfície externa baseada em <i>Kirigami</i>	36
2.3.4	Mecanismo com superfície ciliar	37
2.4	Grupo <i>Ereko</i>	39
2.4.1	Erekobot $\beta - 5$	39
2.4.2	Erekobot $\alpha$	40
2.4.3	Erekobot $\sigma$	40
2.4.4	Erekobot <i>Neke</i>	41
2.4.5	Erekobot VDM	42
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>44</b>
3.1	Projeto Mecânico	44
3.1.1	Escolha dos motores	44
3.1.2	Projeto dos módulos auxiliado por computador	44
3.1.3	Cálculo dos torques em um motor genérico	46
3.2	Projeto Eletrônico	47
3.3	Controle via Computador	51
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>55</b>
4.1	Projeto Mecânico	55
4.1.1	Primeiro módulo	55
4.1.2	Segundo módulo	58
4.1.3	Terceiro Módulo	59
4.2	Projeto Eletrônico	71

4.2.1	Dimensionamento e montagem . . . . .	71
4.3	Controle e Testes de Movimentação . . . . .	76
4.3.1	Descrição da Estratégia de Comando . . . . .	76
4.3.2	Testes da Estratégia sobre os Componentes e o Robô . . . . .	81
4.3.3	Efeito da variação paramétrica da Onda serpenoide sobre a trajetória do Robô . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>96</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	97
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>98</b>

# 1 Introdução

A História humana é marcada pela constante presença de desastres naturais e catástrofes, que envolvem um grande dano tanto material quanto à vida dos indivíduos envolvidos. Por muito tempo, a maneira padrão de se responder a esse tipo de ocorrência era com a ação direta de outro ser humano. Inicialmente por vias de trabalho braçal e posteriormente, com o avanço da tecnologia, com o auxílio de ferramentas mais modernas, as dificuldades relacionadas à presença do ser humano nesses cenários podem ser reduzidas.

No entanto, mesmo diante das melhorias tecnológicas nas áreas de busca e resgate, a presença humana ainda é a maneira mais comum de se lidar com esse tipo de situação, tanto em países desenvolvidos, quanto aqueles em desenvolvimento. Até o momento, não é abundante a quantidade de procedimentos que podem ser executados nessas situações. Para uma ampla e crescente variedade de cenários, a presença humana pode ser substituída por mecanismos autônomos, como robôs móveis. Eles já são capazes de performar tarefas nesses ambientes de desastre como: reconhecimento de ambiente e detecção de pessoas presas (SANFILIPPO et al., 2017), mapeamento de terreno, comunicação a longa distância (WEI et al., 2011) e transporte de bens ou pessoas. (KAMEGAWA et al., 2020).

## 1.1 Contexto e Justificativa

Existem diferentes tipos de robôs e cada um deles é mais adequado para um conjunto específico de características necessárias para determinada tarefa. Dentro da robótica móvel, a presença de mecanismos que usam propulsão motorizada auxiliada por rodas é comum. Apesar desse modelo de movimentação ser aplicado em algumas situações de resgate, como manipuladores apoiados em plataformas movidas a rodas ou esteiras, eles costumam apresentar dificuldade de locomoção em ambientes repletos de escombros, como o apresentado na [Figura 1.1](#), em virtude de sua baixa conformidade estrutural relativa ao ambiente externo. Dessa forma, colisões com escombros e perda da manobrabilidade são problemas comuns em aplicações desse tipo.

Por conta dessa baixa conformidade geométrica e sua consequente incapacidade de locomoção em terrenos acidentados, o uso de robôs modulares pode ser uma solução para o resgate em escombros (LIU; TONG; LIU, 2021). Essa área consiste no uso de estruturas automáticas conhecidas como módulos, que podem ser organizadas no espaço e no tempo de maneira a realizar uma tarefa com a configuração mais adequada segundo algum critério escolhido (SOUSA, 2014). Essa multiplicidade ou até redundância de módulos faz com que mecanismos modulares consigam alcançar pontos desejados enquanto simultaneamente desviam de objetos no caminho dessa trajetória, como exemplificado pela [Figura 1.2](#), algo

Figura 1.1 – Ambiente com escombros.



Fonte: o Autor.

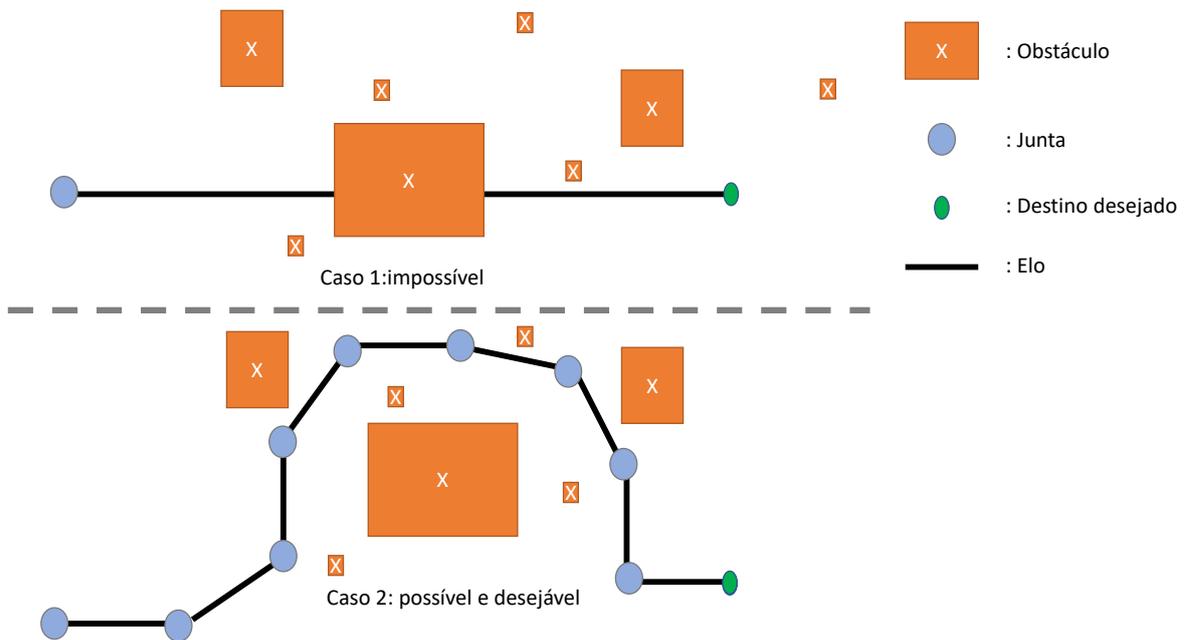
que não seria factível em robôs convencionais.

Em [Figura 1.2](#), o primeiro caso mostra a tentativa de um robô com somente 1 grau de liberdade na tentativa de alcançar um ponto determinado no plano. Percebe-se que o ponto só é alcançado caso parte do robô atravesse o interior de um obstáculo, o que é quando não impossível, pelo menos indesejado. No segundo caso, a presença de mais graus de liberdade facilita o alcance ao ponto desejado sem a aproximação e colisão indevida com os obstáculos presentes ao longo do trajeto. Também é importante salientar que a característica de modularidade é especialmente útil em cenários hostis de busca e resgate pelo fato de que módulos são mais facilmente substituíveis se comparados a mecanismos não modulares.

Na natureza, animais serpentiniformes ou rastejantes como cobras ou minhocas são conhecidos por sua capacidade de locomoção em ambientes apertados ou de difícil locomoção para outros tipos de animais. Por conta disso, ao longo dos últimos 50 anos, desde o trabalho de Shigeo Hirose ([UMETANI; HIROSE., 1974](#)), a abordagem bioinspirada de construção de autômatos mecatrônicos modulares concatenados de maneira linear em uma configuração que se convencionou chamar de robô cobra vem sendo usada para a realização de travessias em terrenos não convencionais, como aqueles repletos de escombros.

Por conta da relativa simplicidade de construção e das excelentes propriedades de atrito entre as direções longitudinal e transversal do movimento, a maioria dos robôs cobra são construídos com rodas acopladas ([LIU; TONG; LIU, 2021](#)). Na maioria dos terrenos, elas

Figura 1.2 – Vista superior de aplicação típica de robôs redundantes.



Fonte: o Autor.

são facilitadoras do movimento desse tipo de mecanismo, no entanto, para ambientes com elevado grau de rugosidade ou presença de escombros de tamanhos variados, muitas vezes maiores até que os próprios módulos, as rodas acopladas podem acabar agindo como pontos de contato indesejáveis entre o conjunto modular e a superfície sobre a qual ele deveria atravessar, dificultando ou até impedindo o seu movimento.

Essa incapacidade de robôs cobra movidos ou auxiliados por rodas de se movimentarem em terrenos muito irregulares faz com que, uma abordagem bioinspirada seja levada em conta. Essa abordagem tem o foco de desenvolver, assim como já existe em cobras reais, uma superfície de contato entre o robô modular e o terreno que ele deve percorrer que apresente anisotropia significativa de atrito ao longo do movimento.

A metodologia de projeto bioinspirada necessária para atender a esta demanda de manufatura permeia campos como a Biomimética, ou seja, a ciência que observa fenômenos e processos da natureza, utilizando seus mecanismos para inspirar soluções que beneficiem o cotidiano das pessoas assim como também a Tribologia, ou seja, a ciência que quantifica atrito, resistência e outras propriedades inerentes ao movimento relativo de duas superfícies, para projetar superfícies que favoreçam o movimento de estruturas modulares inspirados em cobras.

Em virtude da possibilidade de se usar esses mecanismos de atrito superficial entre o conjunto de módulos e o terreno o qual ele irá percorrer para gerar movimento do robô, é possível que esse tipo de mecanismo seja mais adequado para a travessia desses ambientes

supracitados que não comportam bem estruturas autônomas modulares com a presença de rodas. Aqui, como o próprio corpo do robô é o que gera movimento, se um ou mais módulos couber no espaço disponível para o trajeto, com a estrutura adequada, o conjunto inteiro conseguirá percorrer o trajeto. Por conta dessas características, robôs modulares bioinspirados em cobras tanto em seu arranjo geométrico quanto em seu modo de movimentação são muito adequados para a aplicação descrita de locomoção em ambientes com escombros.

A necessidade de melhoria das soluções relativas à resposta e gestão de crises, especialmente crises com risco à vida humana em ambientes ativamente perigosos, como desabamentos ou qualquer outro ambiente que possua escombros ou terreno irregular, impõe a urgência do desenvolvimento de soluções de busca, reconhecimento e resgate. Uma solução amplamente versátil, funcional e preferivelmente de baixo custo seria ideal para esse tipo de aplicação. Robôs cobra podem ser utilizados nesse cenário, por possuírem todas as capacidades desejadas para ele. No entanto, apesar de possível, não há grande variedade de métodos descritos na literatura para mimetização de propriedades materiais das peles de cobra com o objetivo de promover locomoção efetiva em instrumentos modulares rastejantes.

Com o objetivo de propor uma solução para o problema de locomoção em escombros e ainda promover de maneira auxiliar a expansão do conhecimento relativo ao projeto de superfícies capazes de mimetizar efetivamente o comportamento descrito por cobras e outros animais rastejantes durante sua locomoção, o presente trabalho versa sobre a construção de um robô cobra funcional, considerando desde a sua concepção em projeto mecânico, até sua alimentação elétrica, sua instrumentação eletrônica e seu controle computacional. Espera-se que, com esse modelo finalizado, o aparelho desenvolvido possa servir como plataforma de testes para outros trabalhos de graduação na Universidade de Brasília, especialmente aqueles voltados para Robótica Modular no grupo *Ereko*.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho visa construir um protótipo de robô ápole modular encadeado de juntas com eixos de rotação alternados nas direções *pitch* e *yaw*, com geometria reconfigurável que seja capaz de funcionar como plataforma de testes para trabalhos futuros correlatos dentro da universidade de Brasília e especialmente dentro do grupo *Ereko*, assim como executar com boa qualidade os tipos mais comuns de movimentação de serpentes e outros animais rastejantes semelhantes descritos em (GOMEZ, 2008), em (LILJEBÄCK et al., 2013) e em (UMETANI; HIROSE., 1974) por exemplo.

Os objetivos específicos do trabalho podem ser descritos como:

- Do ponto de vista mecânico, espera-se desenvolver um módulo robusto aos principais tipos de esforços mecânicos presentes em situações de busca e resgate, com especifica-

ções de massa reduzidas e geometria superficial adequada para a possível adição de placas de atrito superficial, que seja capaz de abrigar em seu interior, da maneira mais segura e compacta possível os instrumentos eletrônicos necessários para o funcionamento do mecanismo autônomo;

- Do ponto de vista eletrônico, espera-se desenvolver um circuito compatível com a norma brasileira NBR 5410, assim como com as demandas elétricas de todos os componentes usados para realizar a atuação do mecanismo, tanto em regimes de baixo quanto de alto consumo de energia. Para reduzir os esforços mecânicos sobre as juntas do robô, o projeto elétrico e eletrônico deve ter massa reduzida dentro de uma solução de compromisso entre qualidade de locomoção e facilidade de operação.
- Computacionalmente, busca-se garantir que a estratégia de controle de juntas escolhida consiga gerar movimentos similares aos principais padrões de serpentes previamente catalogados, focando na descrição cinemática do movimento, no lugar da modelagem dinâmica do robô, com o mínimo número de fios possível e um baixo custo monetário de modo a garantir a possibilidade de reprodução por parte da comunidade externa;
- Do ponto de vista da movimentação do conjunto, há o objetivo de relacionar o efeito de cada um dos parâmetros usados pela estratégia de controle das juntas com o seu respectivo efeito sobre o deslocamento do protótipo descrito ao longo de um plano horizontal de testes, desconsiderando efeitos dinâmicos não modelados.

### 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho se inicia com uma breve revisão de bibliografia em [Capítulo 2](#). Nela, se explora o modelo matemático de movimentação e planejamento de coordenação de juntas adotado ao longo do trabalho. Nessa revisão matemática, além da exposição de definições básicas da área de Robótica móvel e de manipulação, há uma longa comparação entre a descrição contínua e discreta para a curva serpenoide aplicada a um robô modular. Posteriormente, a revisão aborda algumas das mais atuais soluções para anisotropia superficial de atrito, tanto a nível de manufatura, quanto a nível de projeto de mecanismos. Por último, são descritos alguns dos projetos correlatos previamente desenvolvidos dentro da Universidade de Brasília, especificamente pelo grupo *Ereko*.

Posteriormente, o [Capítulo 3](#) de Metodologia aborda, de maneira empírica e exploratória, a maneira como serão escolhidas as técnicas e estratégias para o desenvolvimento do protótipo de robô modular, por meio de três principais eixos temáticos de desenvolvimento do produto: O Projeto Mecânico, o Projeto Elétrico e Eletrônico e o Controle Computacional. No Projeto Mecânico serão descritas os procedimentos de modelagem auxiliada por computador assim como testes de torque. No Projeto Eletrônico serão abordadas diferentes estratégias

de alimentação e controle, especificamente focando nas conexões elétricas envolvidas e no efeito destas sobre o Projeto Mecânico. Procedimentos de mensuração de corrente e avaliação de consumo de energia para o robô também serão descritos. Já no projeto de controle computacional serão apresentadas estratégias de comando e organização do funcionamento dos motores visando obter os padrões de locomoção desejados para mimetizar a locomoção de serpentes. Ao fim do controle computacional, serão verificados qualitativamente e quantitativamente como a cinemática imposta pelo controlador se revela em condições reais de teste controlado em termos de parâmetros mensuráveis como posição de partes específicas do protótipo.

O [Capítulo 4](#) de Resultados e Discussões traz uma avaliação crítica das técnicas empregadas dentro da metodologia e de seus resultados considerando o projeto como um todo. Ele, apesar de ser dividido da mesma forma que a metodologia, apresenta relações de causa e efeito mais explícitas e mostra como cada decisão efetuada em cada um dos projetos afeta positiva ou negativamente as outras partes dos projetos. Também é mostrado ao final do capítulo se as estratégias de controle computacional adotadas conseguiram gerar os movimentos desejados. Há uma breve avaliação quantitativa dos deslocamentos lineares e transversais, mas não se abordará a variação das grandezas angulares. Por fim, há o [Capítulo 5](#) de Conclusões e Trabalhos futuros.

## 2 Trabalhos Relacionados

Em se tratando do projeto de um robô modular, o presente capítulo aborda uma breve revisão bibliográfica sobre alguns temas importantes no projeto e modelagem de um sistema robótico móvel. Inicialmente são definidos termos como elos e juntas, assim como a cinemática direta e inversa, assim como do que se trata a modelagem dinâmica de um mecanismo. Posteriormente, é abordada a motivação e a modelagem por trás da escolha dos geradores senoidais como estratégia de controle cinemático para o artefato modular desenvolvido. Explica-se que eles são usados para representar na estrutura interconectada como um todo, o que é conhecido por curva serpenoide discreta. Posteriormente, são apresentados outros modelos de robôs previamente feitos ao redor do mundo que exploram, por meio de manufatura, ou por mecanismos, a anisotropia de atrito superficial, tão necessária para o esquema de locomoção por rastejamento. Por último, são apresentadas algumas máquinas semelhantes àquela desenvolvida ao longo deste trabalho dentro da Universidade de Brasília, pelo grupo *Ereko*.

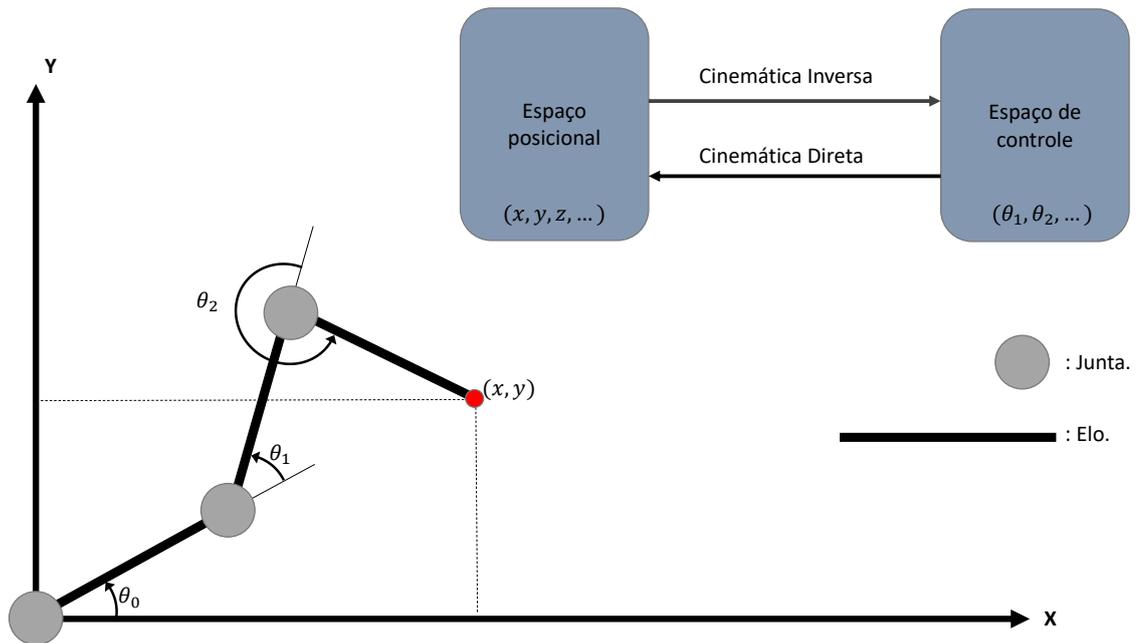
### 2.1 Definições iniciais

Para descrever o funcionamento de um sistema robótico, é importante definir algumas grandezas comumente usadas para descrever o comportamento mecânico do conjunto mecânico e sua relação com outras partes de seu projeto e controle.

Inicialmente, dentro da robótica de manipulação, existe a terminologia de elos e juntas. Conforme (CRAIG, 2005), um elo é descrito como um corpo rígido que pode ter utilidades diversas dentro do mecanismo concatenado, mas tem como principal função mecânica a união entre duas juntas. Uma junta, por sua vez, pode ser definida como o elemento mecanicamente ativo que une dois elos. Por mecanicamente ativo, considere aquilo que é capaz de alterar as distância ou os ângulos medidos entre dois elos. Aplicações reais de juntas podem ser descritas como juntas rotacionais movidas a motores elétricos, ou juntas translacionais, movidas por sistemas pinhão-cremalheira, por exemplo. Essas definições terão também utilidade dentro da robótica móvel descrita ao longo do trabalho.

Para um corpo rígido formado pela interconexão entre elos e juntas, há duas maneiras principais de se descrever o seu comportamento mecânico de movimentação. A descrição dinâmica leva em conta os esforços submetidos a cada uma das partes do robô para planejar trajetórias e determinar as ações de cada uma das juntas. Uma descrição puramente cinemática assume que cada uma das juntas do mecanismo será capaz de efetuar o movimento desejado e foca somente nas relações geométricas entre os elos e juntas e as posições, ou velocidades, ou acelerações que precisam ser alcançadas por determinada parte do conjunto

Figura 2.3 – Descrições cinemáticas de um robô modular.



Fonte: o Autor.

mecânico em questão. Ao longo desse trabalho, por simplicidade, uma descrição cinemática será preferida relativamente a uma possível, mas trabalhosa, modelagem dinâmica.

Dentro da Cinemática, existe um par dual de problemas que se mostra como o ponto central: a cinemática direta e a cinemática inversa. Conforme (CRAIG, 2005, p. 5), a cinemática direta trata do seguinte problema: dado um conjunto de variáveis de junta (no caso considerado, ângulos de junta), encontrar em qual ponto do espaço  $(x, y, z, \dots)$  e em qual orientação um certo ponto do mecanismo irá parar. De uma forma equivalente, a cinemática direta é vista como o mapeamento que parte do espaço de controle  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots)$  e leva para o espaço posicional, de tarefa ou operacional  $(x, y, z, \dots)$ . Por outro lado, a cinemática inversa trata do mapeamento inverso, ou seja, a partir de um conjunto de coordenadas desejadas de posição e orientação, determinar qual o conjunto de variáveis de junta que pode levar o mecanismo para a posição desejada (CRAIG, 2005, p. 5). A Figura 2.3 resume o processo cinemático para um robô articulado com juntas rotacionais. Nela, é possível ver outra convenção importante: os ângulos de junta são medidos sempre partindo do prolongamento do elo anterior, no sentido anti-horário, até tocar no elo ou seu prolongamento colinear posterior.

A descrição cinemática direta e inversa é o par mais comumente usado para descrever a movimentação de robôs sem considerar suas possibilidades dinâmicas de movimentação. Essa descrição é tão mais fácil quanto menores forem os graus de liberdade do mecanismo considerado. Quando há mais graus de liberdade do que os necessários para que um robô consiga chegar a um determinado ponto, ou seja, há múltiplas soluções para

o problema da cinemática inversa, diz-se que o respectivo mecanismo é redundante em termos de movimentação. Para a cinemática direta, o problema da redundância só afeta a complexidade computacional dos cálculos numéricos de métodos tradicionais, como o de Denavit-Hartenberg apresentado em (DENAVID; HARTENBERG, 1955). Para a cinemática inversa, a redundância pode afetar a própria existência de soluções, sendo assim um grande desafio no planejamento de trajetórias para robôs desse tipo. Enquanto a cinemática direta faz uso de relações geométricas mais evidentes entre os elos e juntas considerados, a cinemática inversa não segue um procedimento ainda sistematizado para todos os casos de robôs redundantes. Para mecanismos de juntas somente rotacionais, especializados em situações de busca e resgate em ambiente com escombros, há algumas soluções úteis como as apresentadas em (CHEMBULY; VORUGANTI, 2020).

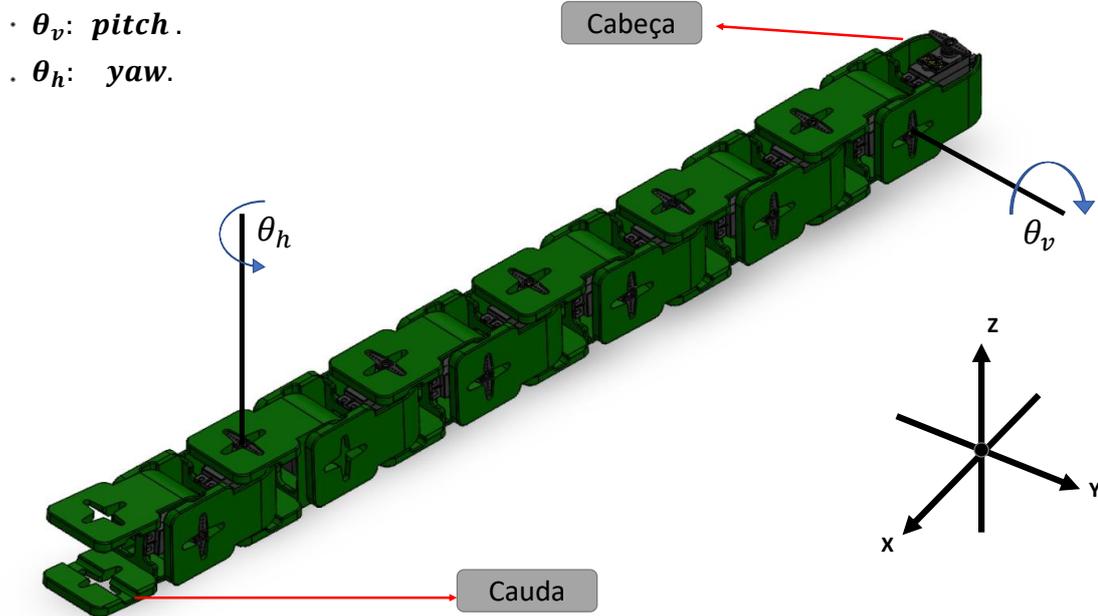
Apesar da utilidade de métodos clássicos como a cinemática direta e inversa, a falta de um modelo dinâmico teoricamente validado e amplamente aplicável para diferentes tipos de terreno inviabiliza a sua garantia de funcionamento. Por esse e outros motivos, o presente trabalho visa, ao invés de resolver e alternar entre cinemáticas direta e inversa, propor um modelo cinemático pré-programado e amplamente conhecido pelo nome de geradores ou osciladores senoidais para cada uma das juntas do mecanismo e avaliar o seu funcionamento global no deslocamento de uma parte avaliada do protótipo, como sua cabeça, cauda ou centro de massa, a depender da conveniência e da hipótese de corpo rígido imposta ao produto considerado ainda em fase de fabricação.

Outra forma comum de descrever o posicionamento de juntas de um mecanismo é por meio do sistema RPY, ou *roll*, *pitch* e *yaw*, do português rolamento, arfagem e guinada, indica o posicionamento do eixo das juntas relativamente aos 3 eixos principais XYZ usados para descrever a posição e orientação de um ponto do autômato mecatrônico no espaço. Conforme demonstrado na Figura 2.4, motores atuantes na configuração *pitch* são capazes de realizar movimento relativo no plano vertical do robô. Motores com orientação *yaw* fazem a locomoção relativa ao longo do plano horizontal. Motores com orientação *roll* não são considerados ao longo desse trabalho, mas são implementáveis, exceto nas extremidades chamadas aqui de cabeça e cauda como em (BERTHET-RAYNE et al., 2018).

A hipótese de corpo ou partes do corpo rígidas interconectadas faz com que toda a descrição cinemática do conjunto mecânico possa ser concentrada em um ponto específico, como por exemplo, no seu centro de massa, conforme mostrado na Figura 2.5. Da mesma forma, ao se tomar pontos como o centro de massa, a cabeça ou a cauda do robô considerado, consegue-se definir as grandezas cinemáticas principais do robô completo: o seu deslocamento de centro de massa  $\Delta\vec{r}$  e o seu deslocamento angular de orientação  $\Delta\gamma$ . Visualmente, elas estão expostas na Figura 2.6.

Matematicamente, o deslocamento  $\Delta\vec{r}$ , ou passo, conforme a Equação 2.1, é a distância percorrida pelo centro de massa ao longo de um ciclo temporal  $T$  de oscilação auto-

Figura 2.4 – Descrição RPY, cabeça, cauda e eixos XYZ para um robô ápole.



Fonte: o Autor.

propelida. Dessa forma, caso o corpo modular se movimente  $T$  periodicamente, sua forma será a mesma nos instantes  $t$  e  $t + T$ . Por outro lado, o deslocamento ou passo angular  $\Delta\gamma$ , conforme a [Equação 2.2](#), para uma movimentação bidimensional, é o ângulo em torno do eixo ortogonal ao plano de movimentação, após um ciclo  $T$ , entre os vetores de orientação do conjunto modular em questão. A orientação em qualquer momento pode ser visualizada como um vetor  $\vec{o}$  que sai da cauda do robô e vai até sua cabeça, indicando a direção do movimento atual do mecanismo analisado.

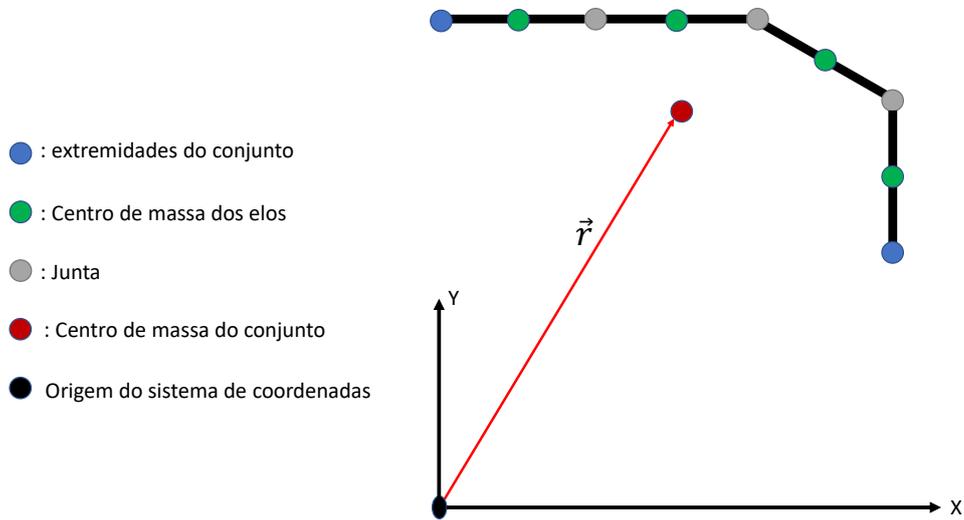
$$\Delta\vec{r} = \overrightarrow{r(t+T)} - \overrightarrow{r(t)}. \quad (2.1)$$

$$\Delta\gamma = \sphericalangle[\overrightarrow{o(t+T)}, \overrightarrow{o(t)}]. \quad (2.2)$$

## 2.2 Controle de juntas por geradores senoidais

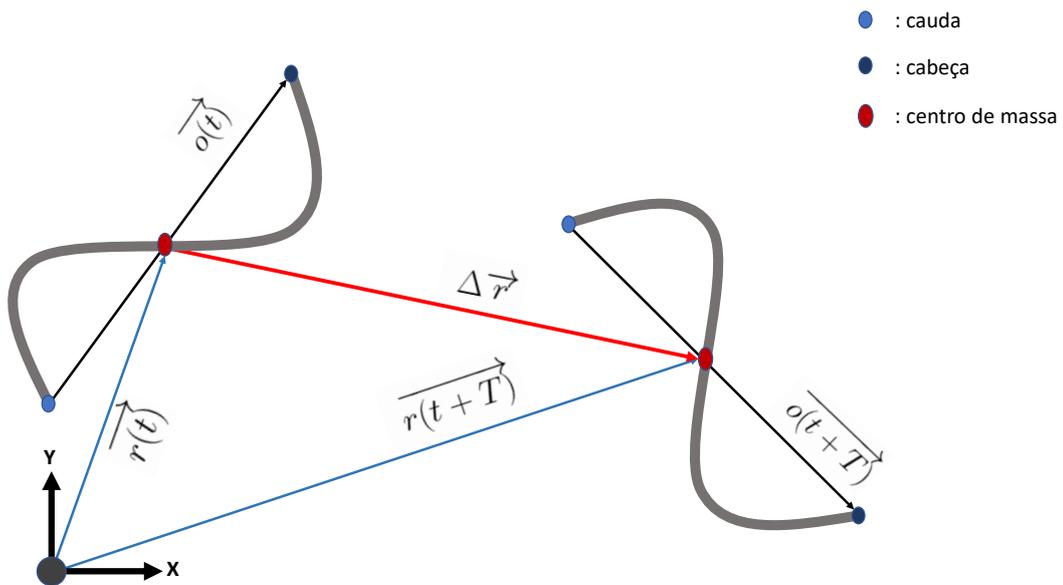
O controle baseado em osciladores ou geradores senoidais é um dos esquemas mais simples e comuns dentro do controle de robôs cobra. Ele é concebido de maneira bioinspirada na teoria de locomoção dos geradores de padrão central (CPG) de modo que cada uma das juntas do mecanismo tem sua atuação controlada por um CPG dedicado, que pode atuar de maneira independente de seus geradores vizinhos. Conforme ([GOMEZ, 2008](#)), o controle de cada gerador é feito sobre o seu respectivo ângulo de junta, aplicando sobre ela um sinal

Figura 2.5 – Centro de massa para um robô articulado.



Fonte: Adaptado de (GOMEZ, 2008).

Figura 2.6 – Deslocamentos para um robô ápole.



Fonte: Adaptado de (GOMEZ, 2008).

periódico com representação em série de Fourier existente e truncada na primeira harmônica, ou seja, um sinal senoidal de ângulo de junta  $\varphi_i(t)$  variante no tempo. Como pode ser visto na [Equação 2.3](#), parâmetros que definem esse sinal senoidal são respectivamente a amplitude  $A_i$ , a fase  $\Psi_i$ , o *offset*  $O_i$ , o número de módulos  $M$  e o período  $T$  de oscilação. Nesse regime de controle, o período costuma ser o mesmo para todos os controladores.

$$\varphi_i(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \Psi_i\right) + O_i, i \in \{1, \dots, M\}. \quad (2.3)$$

O cenário de modelagem proposto aqui considera as seguintes hipóteses:

- O movimento ocorre em superfícies planas sem obstáculos, desconsiderando toda a parte de projeto de sistemas para identificação de terreno e planejamento de trajetória;
- O modelo considera sempre a locomoção em estado permanente em que a velocidade média do mecanismo é constante e o seu padrão de movimentação é o mesmo ao longo de toda a trajetória considerada;
- O modelo considera um cenário periódico de movimentação em que, a cada período  $T$ , o autômato mecânico executa uma sequência conhecida de movimentos básicos, percorre uma distância  $\Delta\vec{r}$  e varia seu ângulo de orientação em  $\Delta\gamma$ . Assim, a repetição do padrão de movimento refletirá proporcionalmente no deslocamento e na mudança de orientação totais.

Do ponto de vista da otimização de trajetória via controle das juntas, há duas formas de aumentar o deslocamento linear e orientação. A primeira é aumentando a frequência de oscilação, pois sob a hipóteses acima, pode-se garantir que uma maior quantidade de movimentos repetidos irá gerar proporcionalmente mais deslocamento e mudança na orientação em um mesmo tempo considerado. A segunda forma é através da coordenação entre as juntas. Considera-se uma boa coordenação aquela que, através da adequada escolha de parâmetros do CPG senoidal, consegue maximizar os parâmetros cinemáticos mensurados:  $\Delta\gamma$  e  $\Delta\vec{r}$ . Para a futura descrição da curva e da onda serpenoide, a segunda forma será adotada. Dessa forma, faz sentido realizar a mudança de variável descrita na [Equação 2.4](#).

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{T}t. \quad (2.4)$$

Essa mudança de variáveis permite reescrever o modelo de controle proposto pela [Equação 2.3](#), mais geral, no modelo proposto pela [Equação 2.5](#), mais focado nos aspectos de coordenação, sem levar explicitamente a dependência com o tempo.

$$\varphi_i(t) = A_i \sin(\phi(t) + \Psi_i) + O_i, i \in \{1, \dots, M\}. \quad (2.5)$$

Em termos de limitação dos parâmetros, tem-se que a fase  $\phi(t)$  fica limitada ao intervalo  $[0, 360^\circ]$  ou  $[-180^\circ, 180^\circ]$  conforme conveniência. O ângulo de junta  $\varphi_i(t)$ , fica

limitado ao intervalo  $\varphi_i \in [O_i - A_i, O_i + A_i]$ . Em condições reais, esse valor limite irá depender da faixa angular útil do atuador escolhido, assim como da geometria do módulo utilizada. Mais detalhes sobre isso serão apresentados adiante na [subseção 4.1.3](#). O *offset*  $O_i$  pode ser visto como um fator que irá deslocar o eixo de simetria de rotação da junta escolhida. Quando  $O_i = 0$ , tem-se o padrão de oscilação senoidal comum em relação ao eixo convencionalizado como o horizontal.

### 2.2.1 Controle de módulos *pitch-yaw*

Em se tratando do controle de um robô modular com blocos *pitch-yaw*, deve-se levar em conta um conjunto de hipóteses adicionais para construir um modelo matemático que explique o funcionamento de cada um dos CPGs. A principal hipótese é que o movimento vertical e o movimento horizontal, respectivamente correspondentes ao movimento causado pelas juntas *pitch* e juntas *yaw*, podem ser descritos separadamente e posteriormente superpostos no movimento final. Essa hipótese decorre do próprio paradigma de controle independente de cada um dos geradores senoidais. Dessa forma, pode-se estudar o movimento em duas frentes: coordenação das juntas *pitch* e coordenação das juntas *yaw*.

Considere inicialmente uma contagem de módulos que se inicia pelo módulo mais caudal do mecanismo e vai até seu módulo mais cranial. A fase de referência será  $\Psi_{v_1}$  caso o módulo caudal tenha junta do tipo *pitch* ou ela será  $\Psi_{h_1}$  caso o módulo tenha junta do tipo *yaw*. Para as juntas *pitch*, para se obter oscilações simétricas em torno do ponto médio da escala de operação da junta, considere o *offset* vertical  $O_{v_i}$  como sendo nulo. Considere também que as amplitudes de oscilação  $A_{v_i}$  para cada um dos geradores verticais é a mesma e que geradores vizinhos do mesmo tipo de junta estejam defasados por uma fase vertical de  $\Delta\phi_v$ . Dessa forma, as fases  $\Psi_{v_i}$  de cada um dos osciladores pode ser obtida pela relação recursiva  $\Psi_{v_i} = (i - 1) \cdot \Delta\phi_v + \Psi_{v_1}$ .

Simetricamente, para as juntas *yaw*, a amplitude  $A_h$  dos osciladores será a mesma em todo o conjunto de módulos considerados, assim como as fases entre 2 módulos vizinhos de mesmo tipo terão uma defasagem fixa de  $\Delta\phi_h$  e também podem ser calculadas recursivamente por uma relação recursiva análoga:  $\Psi_{h_i} = (i - 1) \cdot \Delta\phi_h + \Psi_{h_1}$ . Uma diferença importante é que, caso não se escolha o *offset* horizontal  $O_h$  como nulo, o robô poderá performar movimento circular oscilatório. A conexão entre o movimento vertical e o horizontal é dada por meio de uma diferença de fase  $\Delta\phi_{vh}$  que, com base na fase de referência :  $\Psi_{v_1}$  ou  $\Psi_{h_1}$  a depender de qual dos módulos compõe a cauda do conjunto modular, permite calcular a outra fase inicial correspondente. Por exemplo, se o módulo vertical fosse dado como referência, a relação seria  $\Psi_{h_1} = \Delta\phi_{vh} + \Psi_{v_1}$ .

Com essas definições, os modelos de controle para os osciladores das juntas ficam conforme [Equação 2.6](#) para o caso vertical e [Equação 2.7](#) para o caso horizontal.

$$\varphi_{v_i}(\phi) = A_v \sin(\phi + \Psi_{v_i}), \quad i \in \left\{1, \dots, \frac{M}{2}\right\}. \quad (2.6)$$

$$\varphi_{h_i}(\phi) = A_h \sin(\phi + \Psi_{h_i}) + O_h, \quad i \in \left\{1, \dots, \frac{M}{2}\right\}. \quad (2.7)$$

É importante salientar que, caso um conjunto de juntas (verticais ou horizontais) seja mantido com valor de junta fixo, o resto do módulo irá se comportar como um conjunto robótico unicamente *pitch-pitch* (caso juntas *yaw* estejam fixas) ou unicamente *yaw-yaw* (caso juntas *pitch* estejam fixas) porém, com somente metade das juntas disponíveis para movimentação paramétrica variável.

### 2.2.1.1 Espaço de controle para movimentação em coordenação *pitch-yaw*

Dado um paradigma de comando direto de movimentação de um robô, define-se como o seu espaço de controle o conjunto de pontos possivelmente selecionáveis para cada um dos seus parâmetros configuráveis dentro dos controladores de movimento. Para o caso genérico de um controlador de junta sem restrições paramétricas, o espaço de controle pode ser descrito como o conjunto de parâmetros escolhidos para cada um dos  $M$  osciladores independentes pertencentes às  $M$  juntas, cujas funções de ângulo de junta são da forma  $\varphi(A_i, O_i, \Psi_i)$ . Dessa maneira, o espaço total de controle tem dimensão  $3M$ , com  $M$  sendo o número de módulos do robô.

Logo, quanto maior a quantidade de módulos, maior a quantidade de configurações nas quais esses módulos poderão ser posicionados dentro do mecanismo. No entanto, como regra geral, quanto maior a dimensão analisada, mais difícil é resolver um problema de otimização de trajetórias. Dessa forma, são necessárias as restrições impostas no procedimento de modelagem. Uma restrição adicional imposta em (GOMEZ, 2008, p. 73) é que o número de módulos não será considerado diretamente para o cálculo das dimensões do espaço de controle, pois o espaço procurado é aquele de dimensão mínima, independente do número de módulos, o qual permite apreciar características da movimentação ápole sob um ponto de vista global, independente da implementação.

No caso do movimento *pitch-pitch*, em que todo o movimento do encadeamento modular ocorre em um só plano, os parâmetros configuráveis são as variáveis independentes da função geradora  $\varphi_i = A \sin(\phi + (i - 1)\Delta\phi + \Psi_1) + O_i$ , ou seja,  $\varphi(A, \Delta\phi, O_i)$ . Como esse controlador depende de 3 variáveis, pode-se dizer que seu espaço de controle é tridimensional. No caso comum de *offset* nulo ou constante, esse espaço pode ser reduzido para um espaço bidimensional.

Já o caso do movimento *pitch-yaw* envolve a superposição de 2 movimentos. Já usando as hipóteses de restrição que definem o movimento vertical  $\varphi_v(A_v, \Delta\phi_v)$  como função de 2 parâmetros e o movimento horizontal  $\varphi_h(A_h, \Delta\phi_h, \Delta\phi_{vh}, O_h)$  como função de outros 4

parâmetros, tem-se que o espaço de controle para um mecanismo de conexões *pitch-yaw* tem 6 dimensões.

Em qualquer um desses casos, resolver o problema de coordenação significa encontrar soluções dentro do espaço de controle que otimizem a movimentação do robô conforme um critério definido pelo responsável de operação da máquina. Dessa forma, definições levemente diferentes das propostas em [seção 2.1](#) porém ainda equivalentes, sobre a cinemática direta e inversa do robô apresentado.

- **Cinemática direta:** dado um ponto do espaço de controle do robô, determinar se a locomoção é factível, qual será o tipo de movimento, os valores dos parâmetros cinemáticos básicos  $\Delta\vec{r}$  e  $\Delta\gamma$  e o tamanho do robô;
- **Cinemática inversa:** a partir dos parâmetros cinemáticos desejados  $\Delta\vec{r}$  e  $\Delta\gamma$ , da forma de locomoção e opcionalmente das restrições dimensionais, encontrar o subconjunto de pontos operacionais dentro do espaço de controle que realizam essa locomoção com as dimensões desejadas.

Apesar dessa nova definição, ainda não é claro como os parâmetros dos CPGs e os parâmetros cinemáticos se relacionam, assim como também não é claro como os pontos do espaço de controle se relacionam à configuração das juntas do mecanismo. O primeiro problema será discutido mais adiante na [subseção 2.2.2](#) e o segundo problema será discutido abaixo.

## 2.2.2 Modelo matemático

Conforme descrito na seção anterior, a relação entre os pontos do espaço de controle e as dimensões do conjunto mecânico será descrita aqui em maior profundidade. Para isso, o movimento horizontal e o vertical do robô serão descritos cada um por meio de uma curva respectiva denominada serpenoide. Quando o movimento do robô é unidimensional, usa-se a curva serpenoide. Quando o movimento é tridimensional e se decompõe em 2 curvas serpenoides, tem-se a curva serpenoide tridimensional (3D). Inicialmente a descrição é feita por uma curva contínua, mas essa pode ser discretizada para melhor se adequar ao paradigma modular proposto ao longo do trabalho. Por meio dessas curvas, pode-se obter valiosas relações entre as dimensões do mecanismo, os parâmetros das equações da curva serpenoide e os parâmetros dos CPGs utilizados.

### 2.2.2.1 Curva vs Onda

Ao longo da descrição seguinte, muitas vezes esses termos podem aparecer e gerar confusão. Para evitar esse tipo de entendimento dúbio define-se:

- **curva:** é um conjunto de pontos em um espaço que satisfazem uma relação matemática funcional  $(x,y)$  em que  $y = f(x)$  ou paramétrica em que  $(x,y) = (f(t),g(t))$ . Nesse tipo de ente, sua forma não varia e cada parâmetro mapeia exatamente 1 ponto.
- **onda:** uma onda pode ser definida como uma curva que varia a posição de seus pontos a depender de outro parâmetro não existente ou fixo para o caso de uma curva. Dessa maneira, uma curva é, por analogia, vista como uma fotografia estática de um ente móvel que é a onda. Esse parâmetro adicional da onda é a fase  $\phi$ . A curva é então a forma contínua esperada do sistema robótico quando se tem uma fase fixa.

### 2.2.2.2 A curva serpenoide

Já definida a fase  $\phi$ , define-se agora o comprimento  $s$  da curva que representa também o comprimento entre um ponto fixo do robô (considere como  $s = 0$  a cauda do robô) e um ponto arbitrário ao longo da curva serpenoide. Em  $s = l$ , tem-se a cabeça, logo  $l$  indica o comprimento contínuo total da curva. Outro parâmetro importante é o ângulo de junta. Para modelos contínuos, pode-se considerar um conjunto mecânico composto de infinitas juntas separadas por uma distância infinitesimal  $ds$ . Inicialmente considere o ângulo contínuo de junta como  $\theta(s)$ , medido conforme convenção apresentada na [seção 2.1](#).

A primeira definição formal da curva serpenoide foi descrita em (UMETANI; HIROSE., 1974) através de análise comparativa bioinspirada em cobras reais. Conforme a [Equação 2.8](#), ela é uma curva em que o ângulo de junta varia de forma próxima à senoidal ao longo do comprimento da curva, o qual mimetiza o corpo de uma serpente.

$$\theta(s) = A \sin\left(\frac{2\pi k}{l}s\right). \quad (2.8)$$

Simetricamente, a definição da onda serpenoide só inclui a dependência da fase  $\phi$  conforme a [Equação 2.9](#) demonstra:

$$\theta(s,\phi) = A \sin\left(\phi + \frac{2\pi k}{l}s\right). \quad (2.9)$$

Como o formato serpenoide é de natureza senoidal, ele também é periódico. O comprimento de curva descrito ao longo de 1 período de oscilação é chamado de ondulação. Ao longo de uma curva/onda serpenoide finita, há  $k$  ondulações.

Diferentemente do ângulo de junta  $\theta(s)$ , o qual é medido relativamente ao prolongamento posterior de comprimento  $ds$  da curva, também há o ângulo de curvatura  $\alpha_s$  que é o ângulo formado pela reta tangente à curva/onda em relação ao eixo  $x$ , longitudinal ao comprimento do mecanismo. Quando  $s = 0$ , o ângulo  $\alpha_s$  assume o nome de conhecido como *winding angle*  $\alpha = \alpha_s|_{s=0}$ . A [Equação 2.10](#) descreve o cálculo desse ângulo:

$$\alpha_s = \alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}s\right). \quad (2.10)$$

As coordenadas cartesianas  $(x,y)$  referentes de um ponto da onda serpenoide podem ser calculadas relativamente à sua cauda por meio da [Equação 2.11](#) para  $x$  e de [Equação 2.12](#) para  $y$ . Para essas equações, o ponto desejado relativo à distância  $s$  medida ao longo da curva é medido por integral das projeções de suas componentes de curvatura na direção desejada. Para a distância  $x$ , a projeção é dada por um cosseno; para a distância  $y$ , por um seno.

$$x(s,\phi) = \int_0^s \cos\left(\alpha \cos\left(\phi + \frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds. \quad (2.11)$$

$$y(s,\phi) = \int_0^s \sin\left(\alpha \cos\left(\phi + \frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds. \quad (2.12)$$

O cálculo para as curvas serpenoides é análogo, porém com uma fase  $\phi$  fixa. Em qualquer um desses casos, não existe solução analítica para as equações de distância, logo elas precisam ser resolvidas numericamente.

Para uma análise geométrica mais aprofundada, faz sentido definir em torno da curva serpenoide um retângulo de dimensões mínimas que consegue conter essa curva. As dimensões desse retângulo são sua altura  $h$  e sua largura  $w$ . Uma curva com  $k$  ondulações pode ter sua largura subdividida em  $k$  unidades de largura  $\lambda$ , denominado comprimento de onda dessa curva.

Para definir a altura, considera-se o caso em que o robô oscila simetricamente em torno do eixo  $x$ , com pelo menos uma ondulação completa ( $k \geq 1$ ), assim como uma curvatura  $\alpha$  máxima de  $90^\circ$ . Dessa forma, o primeiro ponto de máximo da curva/onda é dado pelo ponto  $s_h$ . Nele, a curvatura é nula, por definição. Na primeira ondulação, em ([GOMEZ, 2008](#), p. 78) prova-se que  $s_h = \frac{l}{4k}$ . Desse modo, sob a hipótese da oscilação simétrica em torno de  $x$ , a altura  $h$  será o dobro da ordenada  $y$ , conforme [Equação 2.13](#). Por outro lado, o cálculo da largura  $w$  da curva irá depender do ponto  $s_w$  que é aquele sob o comprimento da curva no qual se finaliza o seu primeiro período espacial ou ondulação. Por conta dessa definição, é evidente que o valor de  $s_w$  é de  $s_w = \frac{l}{k}$ . Dessa forma, o cálculo de  $w$  pode ser feito através da [Equação 2.14](#). Para um mesmo tamanho de robô ou de serpente analisado, o seu comprimento não varia caso sofra um deslocamento horizontal, ou seja, de fase. Por isso, as dimensões são as mesmas para a curva e a onda serpenoides.

$$h = 2 \cdot y(s_h) = \int_0^{\frac{l}{4k}} \sin\left(\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds. \quad (2.13)$$

$$w = kx(s_w) = k \int_0^{\frac{l}{k}} \cos\left(\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds. \quad (2.14)$$

### 2.2.2.3 A curva serpenoide 3D

De maneira análoga ao que foi descrito para o caso da curva serpenoide, tem-se que a curva serpenoide 3D pode ser descrita como uma superposição de duas curvas serpenoides em planos perpendiculares de movimentação. Essas curvas, usando o ponto  $s = 0$  para cálculo, terão entre si uma defasagem de  $\Delta\phi_{vh}$ . À cada plano são associadas variáveis análogas ao caso anterior. Logo, cada plano terá seus próprios ângulos de junta  $\theta$ , sua própria curvatura  $\alpha_s$ , seu próprio número de ondulações  $k$ . Dois nomes serão adotados para os planos básicos de movimentação. O plano vertical, no qual se observam as rotações devido às juntas *pitch*, será identificado pelo subscrito  $v$ . O plano horizontal, no qual se observam as rotações devidas às juntas *yaw*, será identificado pelo subscrito  $h$ . Assim, pode-se definir os ângulos de junta  $\theta_v$  via [Equação 2.15](#) e  $\theta_h$  via [Equação 2.16](#) medidos relativamente às suas respectivas projeções tangentes de retas partindo do ponto  $s$  até o ponto  $s + ds$ .

$$\theta_v(s) = A_v \sin\left(\frac{2\pi k_v}{l}s + \Psi_v\right). \quad (2.15)$$

$$\theta_h(s) = A_h \sin\left(\frac{2\pi k_h}{l}s + \Psi_h\right). \quad (2.16)$$

Com base nessas equações, (GOMEZ, 2008) mostra que é possível escrever também os ângulos de junta para as ondas serpenoides 3D, inserindo a dependência de fase, conforme esperado. A [Equação 2.17](#) mostra como a dependência de fase afetaria  $\theta_v$ . Da mesma forma, a [Equação 2.18](#) demonstra o efeito da fase sobre  $\theta_h$ .

$$\theta_v(s, \phi) = 2\alpha_v \sin\left(\frac{2\pi k_v}{M}\right) \sin\left(\phi + \frac{2\pi k_v}{l}s\right). \quad (2.17)$$

$$\theta_h(s, \phi) = 2\alpha_h \sin\left(\frac{2\pi k_h}{M}\right) \left(\phi + \frac{2\pi k_h}{l}s + \Delta\phi_{vh}\right). \quad (2.18)$$

Conforme descrito antes, com os parâmetros  $\alpha_v$ ,  $\alpha_h$ ,  $k_v$ ,  $k_h$  e  $\Delta\phi_{vh}$ , consegue-se determinar todo o espaço de controle para esse tipo de curva ou onda.

### 2.2.2.4 Discretização das Curvas e Ondas serpenoides

O processo de discretização não altera a natureza matemática oscilatória da curva, porém restringe o conjunto de características que a descreve para um conjunto finito de  $M$  módulos ou blocos, a depender da abrangência do modelo proposto. Em qualquer protótipo modular, o processo de discretização dos ângulos de juntas deve ser feito para fins práticos.

Enquanto no caso contínuo, o ângulo  $\theta(s)$  varia continuamente ao longo do comprimento da curva, no caso discreto, ele varia conforme a [Equação 2.19](#). Para uma fase fixa, a [Equação 2.19](#) descreve uma curva serpenoide. Já para uma fase  $\phi$  que pode variar, há a descrição de uma onda serpenoide discreta. Nesse caso, a variável  $i \in [1, M]$  indica a  $i$ -ésima posição, ou a  $i$ -ésima junta do seu respectivo módulo. Para um modelo matemático que leva em conta a existência de módulos, a curvatura discreta  $\alpha_i$  é aquela calculada pelo ângulo entre a linha central do elo à esquerda da junta calculada e o eixo x, no qual ocorre o deslocamento transversal do robô. O comprimento total da curva discreta é dado pela soma dos comprimentos de seus módulos, excluídas as porções que se sobrepõem. Formalmente, se cada um desses comprimentos não sobrepostos for nomeado de  $L$ , então tem-se que o comprimento total  $l$  será  $l = M \cdot L$ .

$$\varphi_i = A \cdot \sin(\phi + Bi) . \quad (2.19)$$

Por outro lado, caso se considere a ideia de modelagem matemática via blocos, consegue-se um grau maior de generalidade relativa à geometria adotada no protótipo de um robô cobra discreto. Nesse sentido, considerando uma simplificação via elos e juntas, pode-se realizar a discretização da curva ou onda ao calcular os parâmetros nos pontos  $s$  de interesse. Dois pontos notáveis são:

- A posição das juntas nos pontos em  $s = d_0 + (i - 1) \cdot d$  ;
- O ponto médio da conexão da união entre os blocos em  $s = (i - 1) \cdot d$

Considerando a inclinação contínua e aplicando as restrições descritas acima, pode-se encontrar as curvaturas discretas  $\alpha_i$  conforme a [Equação 2.20](#) para a onda serpenoide. Analogamente, caso se fixe a fase  $\phi$ , tem-se a definição para a curva serpenoide equivalente.

$$\alpha_i = \alpha \cos\left(\phi + \frac{2\pi k}{M}(i - 1)\right), \quad i \in \{1, \dots, M\}. \quad (2.20)$$

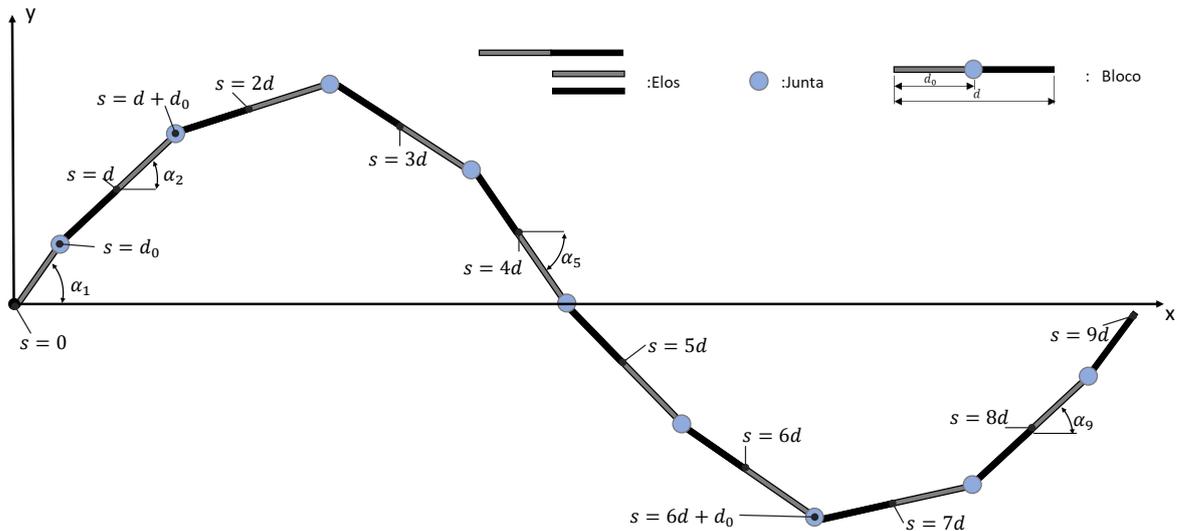
Com a mesma metodologia, os ângulos discretos de junta podem ser calculados nos pontos de interesse. A [Figura 2.7](#) demonstra um conjunto modular ápole discreto executando a curva serpenoide discreta 2D. O mesmo ocorreria para o caso 3D.

O trabalho de ([GOMEZ, 2008](#)) em conjunto com trabalhos anteriores, chegou em uma relação descrita na [Equação 2.21](#), que define o ângulo de junta discreto como uma função dos parâmetros  $\alpha$ ,  $k$ ,  $d$ ,  $d_0$ ,  $M$  da onda serpenoide.

$$\varphi_i(\phi) = 2\alpha \sin\left(\frac{\pi k}{M}\right) \cdot \sin\left\{\phi + \frac{2\pi k}{M}\left[(i - 1) + \frac{d_0}{d}\right]\right\}, \quad i \in \{1, \dots, M\}. \quad (2.21)$$

Para as dimensões físicas do retângulo mínimo que contém o robô modular em seu plano de movimentação:  $h$  e  $w$ , tem-se que ambas irão depender da fase  $\phi$  na qual a onda serpenoide

Figura 2.7 – Descrição geométrica da curva serpenoide discreta.



Fonte: baseado em (GOMEZ, 2008).

foi fixada. Para cada fase, haverá valores distintos de dimensões do retângulo base. Em um ciclo de oscilação, esses valores serão calculados como o máximo de seus análogos contínuos dentro de um ciclo de oscilação. Em termos de equações, há que a altura  $h$  continua sendo dada pela diferença do valor  $y$  máximo e de seu mínimo dentro do círculo, assim como a largura  $w$  continua sendo dada de maneira análoga, exceto que para o eixo  $x$  e levando em conta qualquer segmento ou parte de elo que passe do ponto de cálculo, desde que efetivamente projetado sobre o eixo de cálculo. O cálculo efetivo das posições nos eixos  $x$  e  $y$  dependerá da estratégia adotada para a realização da modelagem cinemática direta do sistema robótico. A Equação 2.22 e a Equação 2.23 demonstram o cálculo formalizado para  $h$  e  $w$ .

$$h = \max \{h(\phi)\} = \max \{y_{\max}(i, \phi) - y_{\min}(i, \phi) = y(i_{\max}, \phi) - y(i_{\min}, \phi)\}. \quad (2.22)$$

$$w = \max \{x(M, \phi) + (d - d_0) \cdot \cos(\alpha_{M+1}(\phi))\}. \quad (2.23)$$

O caso da discretização para a curva ou onda serpenoide 3D segue o mesmo conjunto de passos e princípios utilizados no caso da discretização anterior. Para o ângulo de junta vertical  $\varphi_v$ , basta aplicar  $\theta(s)$  nos pontos  $s = (i - 1) \cdot d + d_0$ . Para os ângulos de junta horizontais, a aplicação ocorre nos pontos  $s = (i - 1) \cdot d + d_0 + \frac{d}{2}$ . Esse procedimento gera como resultado o que está expresso na Equação 2.24 e na Equação 2.25. Essas são as equações mais importantes em termos do esquema de controle cinemático proposto ao longo do trabalho.

Tabela 2.1 – Resumo da relação entre espaço de controle e tipo de movimento utilizado.

Locomoção	Parâmetros	Graus de Liberdade	Definições
yaw-yaw	$(\alpha_h; k_h)$	2	$\alpha_v \rightarrow 0$ ; $k_h = k_v = k$ $ \Delta\phi_{vh}  \rightarrow 90^\circ$
pitch-pitch	$(\alpha_v; k_v)$	2	$\alpha_h = 0$ análogo ao yaw-yaw
pitch-yaw	$(\alpha; k; \beta)$	3	$\alpha_h = \alpha \cdot \cos(\beta)$ ; $\alpha_v = \alpha \cdot \sin(\beta)$ ; $k_h = k_v = k$ $ \Delta\phi_{vh}  \rightarrow 0$

Fonte: (GOMEZ, 2008, p. 167).

$$\varphi_{v_i} = \theta(\phi) \Big|_{s=(i-1)d+d_0} = 2\alpha_v \sin\left(\frac{2\pi k_v}{M}\right) \cdot \sin\left[\phi + \frac{4\pi k_v}{M} \cdot \left(i - 1 + \frac{d_0}{d}\right)\right]. \quad (2.24)$$

$$\varphi_{h_i} = \theta(\phi) \Big|_{s=(i-1)d+d_0+\frac{d}{2}} = 2\alpha_h \sin\left(\frac{2\pi k_h}{M}\right) \cdot \sin\left[\phi + \frac{4\pi k_h}{M} \cdot \left(i - \frac{1}{2} + \frac{d_0}{d}\right) + \Delta\phi_{vh}\right]. \quad (2.25)$$

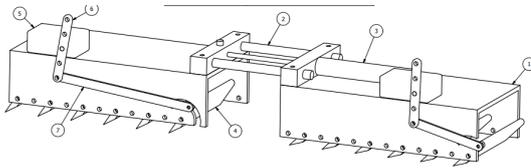
Após definir de maneira geral quais são os parâmetros e as funções que definem o modelo cinemático proposto, é necessário especificar como cada combinação de parâmetros gera cada tipo de movimento proposto. Para isso, (GOMEZ, 2008, p. 167) sumarizou combinações de parâmetros que teoricamente levam para certos tipos classificados de movimento semelhante ao desenvolvido por serpentes reais na [Tabela 2.1](#).

## 2.3 Anisotropia de Atrito

Conforme atestado em (LILJEBÄCK et al., 2013), a anisotropia, ou seja, a diferença de intensidade conforme a direção considerada, de coeficiente de atrito entre a superfície de um robô cobra e a superfície na qual ele irá se deslocar é essencial para o deslocamento de multiarticulados com movimentação totalmente dependente de propulsão por meio do próprio corpo. Trabalhos posteriores como os de (GALEMBECK, 2018; GOMES, 2023) e (ROCHA, 2023a) exploram localmente como essa anisotropia pode ser modelada e como ela efetivamente impacta o deslocamento considerado. Pesquisas conduzidas em (HU et al., 2008) indicam que cobras reais são capazes de ativamente alterar a disposição de escamas em sua pele de modo a induzir fisicamente a anisotropia de atrito. Abaixo, há uma descrição de modelos semelhantes de robôs cobra não associados à Universidade de Brasília, especialmente desenvolvidos para alcançar a anisotropia de atrito superficial relativa à direção do movimento considerada. Alguns deles alcançam essa anisotropia por meio de manufatura e outros por meio de mecanismos.

Figura 2.8 – Robô de alteração de atrito anisotrópico ativo.

(a) Mecanismo ativo de alteração de coeficiente de atrito.



(b) Módulo com texturas aparentes.



Fonte: (MARVI et al., 2011).

### 2.3.1 Mecanismo ativo de alteração do coeficiente de atrito frontal

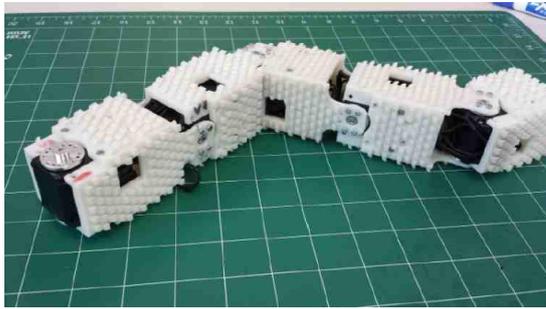
O *Scalybot* (HU et al., 2008) é um robô modular com 3 unidades capaz de ativamente alterar o seu coeficiente de atrito, assim como cobras reais. Se em cobras reais, essa alteração ocorre por meio da variação do ângulo de ataque das escamas ventrais e o levantamento de seus corpos, no sistema robótico descrito, ela ocorre por meio de um mecanismo construído especificamente para esse fim, como mostrado pela Figura 2.8a. O seu esquema de controle de servomotores atua sobre cada um de forma independente, de modo que, para cada mecanismo e sua respectiva superfície de contato, pode haver um valor diferente de coeficiente de atrito favorecendo escorregamento quando é conveniente e auxiliando na fixação da mesma maneira. Com esse mecanismo, o produto descrito conseguiu se mover em superfície inclinada de poliestireno expandido em até 45°, como mostrado pela Figura 2.8b. Até então, o projeto do mecanismo está limitado a variar o atrito somente na direção longitudinal do robô.

### 2.3.2 Superfície rígida texturizada

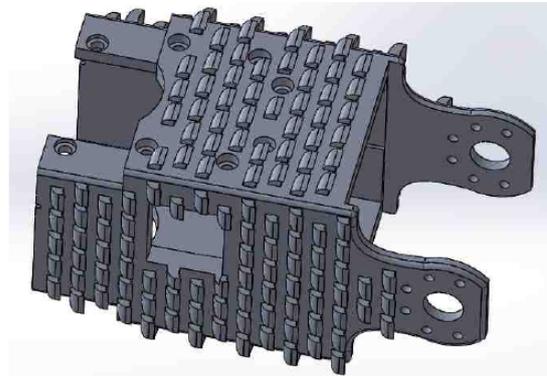
Apesar de não possuir um nome oficial, trata-se de um autômato modular dependente da anisotropia superficial de atrito para sua locomoção. Conforme descrito em (SERRANO et al., 2015), cada um de seus módulos é igualmente texturizado com um padrão regular que visa gerar essa anisotropia. Nos testes, foram usados 6 servomotores Dynamixel RX-28 de alta performance, cada um dentro de um chassi protetor texturizado para atrito. São 3 sentidos de atrito estudados, para frente, mais baixo; para trás, intermediário e para os lados, mais alto. A geometria dessas texturas é impressa em plástico ABS por meio de uma impressora Stratasys Dimension1200es, com resolução de 0,33 mm. Ele é organizado com conexões *pitch* e *yaw* alternadas, formando assim 3 blocos básicos, cada um com 2 graus de liberdade de rotação. Ao testar a movimentação unicamente lateral em movimentos *yaw-yaw*, a superfície

Figura 2.9 – Robô e sua textura induzida via manufatura.

(a) Robô modular texturizado.



(b) Módulo com texturas aparentes.



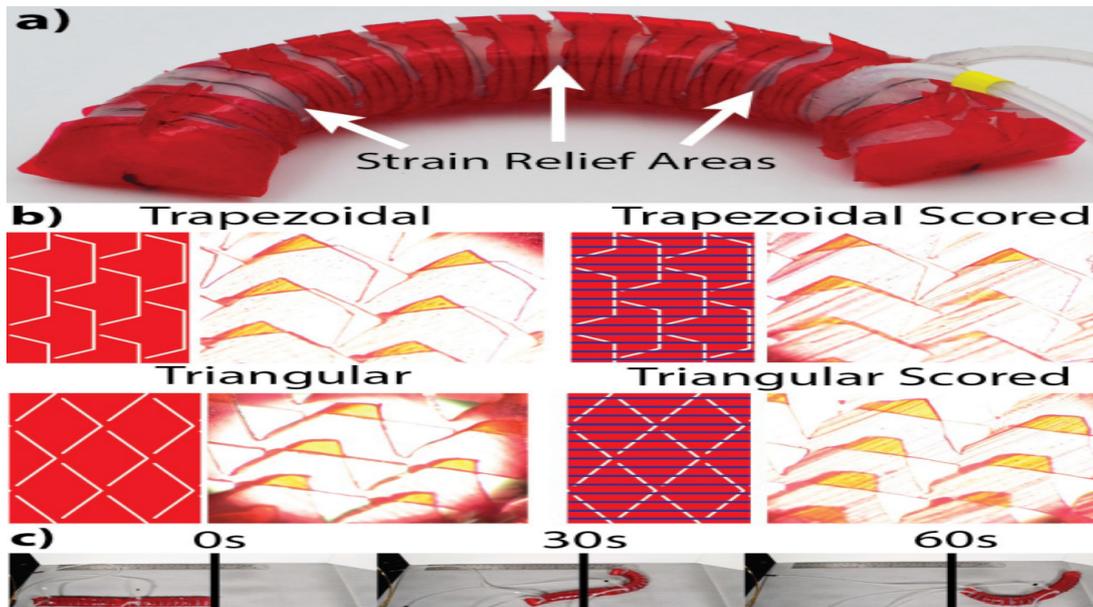
Fonte: (SERRANO et al., 2015).

do robô aderiu ao carpete no qual os testes foram realizados, de forma que o movimento não foi completado. Notou-se entretanto que a aplicação de um movimento *pitch* não nulo simultaneamente ao movimento *yaw* resultava em uma melhor eficiência de movimentação, sem a aderência impeditiva anterior. Quando testado sem a anisotropia de atrito, o conjunto robótico apresentou um movimento não esperado de deriva em relação à sua trajetória com anisotropia, que era majoritariamente retilínea. A Figura 2.9a demonstra o robô texturizado em uma configuração típica de operação. Já a Figura 2.9b demonstra uma vista com foco nas suas rugosidades que induzem anisotropia de atrito.

### 2.3.3 Superfície externa baseada em *Kirigami*

Esse protótipo, apresentado em (BRANYAN; HATTON; MENGÜÇ, 2020), coleta resultados do caso anterior supracitado, mas desenvolve o estudo do atrito levando em conta o atrito também na direção lateral, o que não tinha sido feito pelo projeto antecessor. Para desenvolver a superfície utilizada, os autores propuseram o uso do método de projeto baseado na arte japonesa *Kirigami* como uma alternativa viável para indução de anisotropia de atrito. Essa arte basicamente utiliza cortes em folhas ou chapas finas, de modo que, após a manufatura, quando estas são tensionadas unidirecionalmente, ocorre flambagem em diferentes regiões dessa superfície, o que, a depender do padrão cortado, pode alterar as características de atrito resultantes na superfície. Ao longo do artigo, foi demonstrado que, assim como as cobras reais, esse tipo de mecanismo consegue alterar a posição de suas escamas para aumentar o atrito. De modo a intensificar o aumento desse atrito, foram adicionadas micro ranhuras nas folhas de poliéster ao longo do eixo longitudinal. Os atuadores utilizados são do tipo pneumático. A superfície externa do robô se deforma à medida que o próprio mecanismo se deforma, de modo que seus coeficientes de atrito variam ao longo da trajetória. Após fixar o robô em duas posições representativas, os autores do trabalho testaram os coeficientes de

Figura 2.10 – Robô como superfície baseada em *Kirigami*.



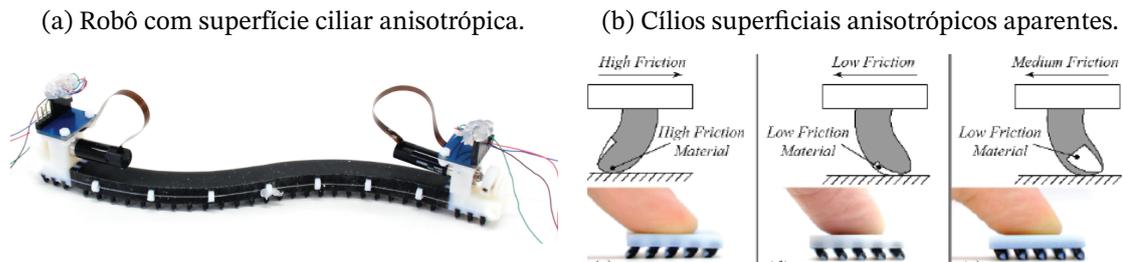
Fonte: (BRANYAN; HATTON; MENGÜÇ, 2020).

atrito em ambas as direções. As taxas de anisotropia de atrito encontradas foram similares àquelas encontradas na natureza de acordo com os estudos citados. O padrão triangular de superfície foi o mais bem sucedido em aumentar velocidade de trajetória, e todas as superfícies se beneficiaram das micro ranhuras. Esse modelo estabelece a possibilidade de se usar o *Kirigami* em projetos de robôs cobra e mostra bons resultados nesse sentido. A [Figura 2.10](#) demonstra o mecanismo baseado em *Kirigami* em uma configuração típica de operação.

### 2.3.4 Mecanismo com superfície ciliar

Esse modelo de sistema robótico é, até o presente momento, um dos maiores casos de sucesso em termos de aproveitamento de anisotropia de atrito entre uma superfície robótica e o terreno no qual ela se locomove. Apesar das possibilidades de geração de atrito anisotrópico mostradas até aqui, não há um procedimento ou resultado consolidado que seja amplamente aceito para gerar movimento serpentino efetivo em robôs móveis apodais. A proposta de solução dada por esse modelo é usar estruturas capilares manufaturadas aditivamente por meio da impressora multimaterial *Objet260 Connex3™*, unindo, em cada seção do capilar, uma área de material com baixo atrito e outra de material com alto atrito. Ao posicionar corretamente os capilares na base do módulo, eles se deformam de modo que, ao ir no sentido longitudinal de movimento do robô modular, para frente, o material de menor atrito entra em contato com o solo. Ao ir para os lados, o material de alto atrito entra em contato com o solo. Dessa maneira, a anisotropia de atrito é obtida, considerando a placa inferior do módulo do conjunto como o objeto estudado. O material de baixo coeficiente de atrito utilizado foi o

Figura 2.11 – Robô com superfície ciliar anisotrópica de atrito.



Fonte: (TA et al., 2022).

polipropileno rígido *VeroWhite* e o material de alto coeficiente de atrito foi a resina flexível *TangoBlack*. Cada placa de superfície anisotrópica contém 25 capilares multimateriais.

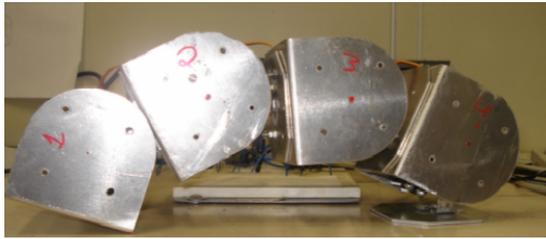
Ao variar a proporção de material na seção transversal do capilar, assim como as características geométricas da placa de atrito também se varia consequentemente os coeficientes de atrito da placa. Não houve ainda um estudo extensivo sobre a influência de cada um dos parâmetros geométricos sobre os respectivos coeficientes de atrito, logo podem-se efetuar muitos testes em relação a esses parâmetros, supondo que o processo de manufatura das placas de atrito multimateriais seja alcançável em termos de infraestrutura da Universidade de Brasília.

Do ponto de vista da locomoção, o corpo do mecanismo é feito de material flexível *TangoBlackPlus* e sua movimentação é feita por 2 motores DC Maxon 347726, controlados por um microcontrolador Arduino Nano, que atuam sobre 2 tendões que percorrem o comprimento do robô e são fixados a ele em pontos estratégicos. O movimento dos motores causa contração e extensão dos tendões, os quais, por estarem fixados ao corpo do conjunto, fazem com que este se mova conforme o movimento dos motores. O movimento do mecanismo é suficiente para gerar deslocamento nas placas de atrito, as quais, pela interação anisotrópica de atrito com a superfície de apoio, geram o deslocamento do sistema como um todo. Do ponto de vista do peso, esse é também um dos robôs modulares mais leves, pesando apenas 0,238 kg. A alta maleabilidade dos materiais com os quais o protótipo foi construído faz com que a frequência de oscilação dos motores precise ser maior que em outros modelos clássicos, com rodas, por exemplo. A Figura 2.11a demonstra o robô supracitado em uma configuração típica de operação. Já a Figura 2.11b demonstra a estrutura geométrica da placa de atrito usada para gerar o movimento.

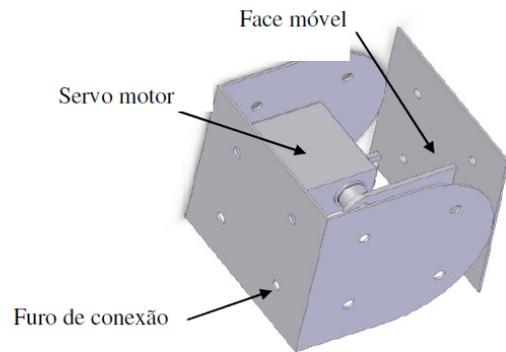
Esse conjunto de mecanismos cobra expõe várias características úteis do ponto de vista tanto da manufatura quanto de mecanismos atualmente utilizados para induzir movimentação baseada em anisotropia de atrito. Em cada um deles, há um grupo de características que facilita o seu deslocamento com base em alguma métrica definida pelos criadores. Esse conjunto de sistemas modulares serve como base para futuras propostas de criação de robôs semelhantes, de modo que estes melhorem as características propostas pelos anteriores.

Figura 2.12 – Vistas do Erekebot  $\beta$ .

(a) Vista lateral do robô montado.



(b) Vista isométrica da montagem via CAD.



Fonte: (SOUZA et al., 2010).

## 2.4 Grupo Ereko

Criado na Universidade de Brasília há mais de uma década, o grupo *Ereko* trabalha com projetos de Robótica Modular e Robótica Educacional, atuando tanto nas redes de ensino do Distrito Federal, assim como de outros estados do Brasil. A origem da palavra *Ereko* vem do Tupi-guarani e significa "andar juntos". Essa nomenclatura é tanto adequada para aplicações de robótica modular, quanto também pelo aspecto interdisciplinar do grupo, que trabalha tanto na área do ensino, quanto no *Design* e na modelagem matemática, entre outras áreas.

Ao longo de toda a trajetória do grupo, um tema recorrente é o projeto e construção de robôs ápodes interconectados em forma de corrente e com propulsão baseada na interação entre sua superfície externa e o meio no qual o mecanismo se apoia. Resumidamente, robôs cobra. Abaixo, segue uma breve descrição histórica dos modelos desenvolvidos pelo grupo, assim como suas vantagens e desvantagens ao longo dessa evolução.

### 2.4.1 Erekebot $\beta$ - 5

Esse modelo é o primeiro a ser desenvolvido pelo grupo *Ereko* na Faculdade de Tecnologia da UnB. Apresentado em (SOUZA et al., 2010), e conforme Figura 2.12a e Figura 2.12b o seu projeto mecânico contém 4 módulos iguais, fabricados em chapas dobradas de alumínio de 2 mm de espessura e um servomotor *Hxt 12K Metal Gear* capaz de erguer 2 outros módulos adjacentes conectados entre si via parafusos com dimensões de  $70 \times 70 \times 70$  mm e 160g de massa total, com 1 grau de liberdade associado a cada módulo. Eletronicamente, seu circuito se divide em alimentação de 4 a 6 V e 3.5 A para motores e alimentação de 12 V e 1 A para o microcontrolador. Seu controle é realizado pelo microcontrolador *BasicStep BS1* e a atuação dos motores segue uma lógica de lista de ângulos. O tempo de espera entre as atuações dos motores é de 500 ms. Apesar de testado somente para as configurações

Figura 2.13 – Vistas do Erekebot  $\alpha$  e  $\beta$ .

(a) Vista do módulo montado.

(b) Comparação entre os modelos  $\alpha$  e  $\beta - 5$ .

Fonte: (SOUZA et al., 2011).

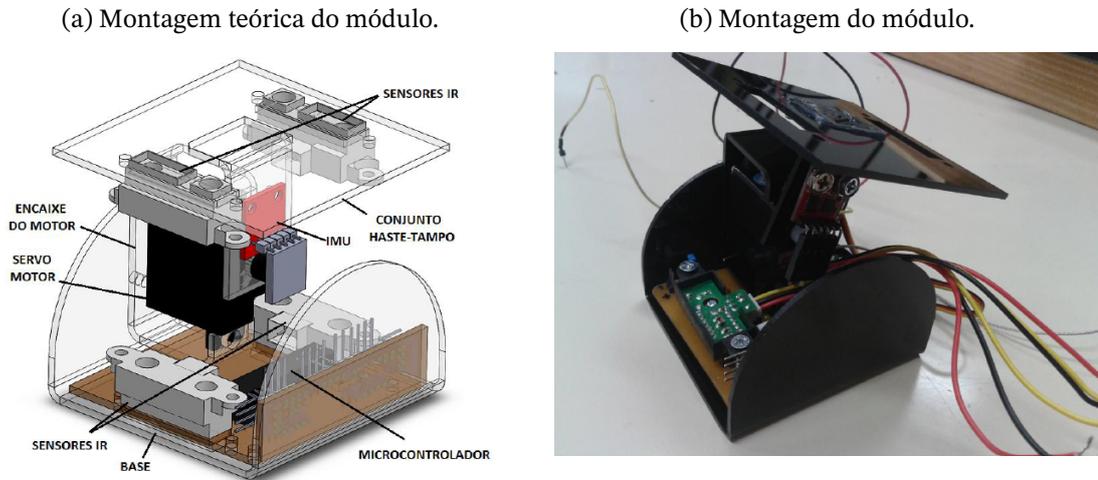
*pitch-pitch*, cada módulo tem 4 faces de conexão, o que faz com que ele teoricamente seja capaz de realizar locomoção *yaw-yaw* e *pitch-yaw*. Seu número de módulos se mostrou como um fator limitante, o qual afetou negativamente a estabilidade proposta do movimento.

#### 2.4.2 Erekebot $\alpha$

Conforme o trabalho desenvolvido em (SOUZA et al., 2011), o módulo Erekebot  $\beta - 5$  apresentava problemas de locomoção em altas frequências, com vibração e problemas de suporte inadequado entre os módulos, assim como altos esforços mecânicos sobre cada uma de suas juntas em função dos tamanhos dos módulos e de sua massa associada. Visando corrigir esses problemas e explorar novas formas de fixação modular, surge o Erekebot  $\alpha$ , conforme Figura 2.13a. Com uma estrutura modular de dimensões  $40 \times 40 \times 40$  mm, formado por chapas dobradas de fibra de vidro e servomotores menores *TGY-90s* de 1,5 Kgf·cm de torque e massa total de 48 g, cada módulo se fixa ao seu adjacente por meio de velcros. Considerando o tamanho e a massa do módulo, essa troca de forma de fixação gera muitos benefícios em termos de capacidade de reconfiguração e de manutenção. Em termos de conexões elétricas, cada módulo possui um microcontrolador, unido a uma bateria recarregável, um regulador de tensão e o respectivo servomotor. O controle dos servomotores é realizado por meio de um canal PWM de 8 bits e cada módulo é capaz de se comunicar via rádio sem o auxílio de fios. Entretanto, o robô ainda mantém parte de sua comunicação intermodular via fios. Para essa escolha de módulo, o conjunto consegue-se obter movimentos tanto do tipo *pitch-pitch*, quanto *yaw-yaw*, quanto *pitch-yaw*, além de outras configurações por meio da fixação intermodular via velcro.

#### 2.4.3 Erekebot $\sigma$

Em termos de estrutura, o modelo  $\sigma$  mantém os mesmos materiais e fixação do caso anterior, conforme Figura 2.14a. No entanto, suas dimensões são aumentadas para

Figura 2.14 – Vistas do Erekebot  $\sigma$ .

Fonte: (SOUSA, 2014).

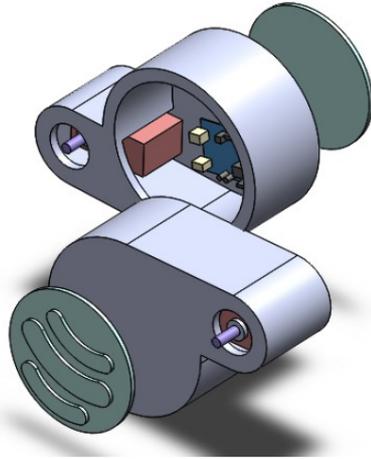
70 × 70 × 70 mm de modo a encaixar todo o novo circuito de sensoriamento proposto. O servomotor utilizado é o Hitec HS-85BB, com 3,5 kgf·cm de torque, capaz de elevar, da mesma maneira que nos casos anteriores, 2 outros módulos adjacentes, fixados via velcro. A instrumentação aplicada ao módulo consiste de uma unidade de medição inercial (IMU) com um acelerômetro ADXL345 e um giroscópio ITG-3200, além de quatro sensores IR SHARP GP2Y0A41SK0F. Também estão presentes 2 sensores infravermelhos (IR). A presença da IMU garante a capacidade de estimação de posição do robô, assim como a detecção de conexão e desconexão dos módulos adjacentes. Os sensores IR são capazes de alinhar os módulos entre si, assim como relativamente ao ambiente no qual o mecanismo é aplicado. Para esse módulo esse ambiente é o interior de tubulações específicas para a indústria de petróleo. Em termos de comunicação e de esquema eletrônico, o modelo  $\sigma$  e o modelo  $\alpha$  não diferem de maneira considerável. Um ponto importante é que a alimentação do modelo  $\sigma$  é feita de maneira cabeada, externamente aos módulos. Há implementações semelhantes, como a executada em (LIU et al., 2019). Esse modelo consiste, até então, no maior caso de sucesso dentro do grupo *Ereko*, quando se considera o grau de compactação entre todos os componentes propostos. Além de uma estrutura física modular capaz de realizar os movimentos propostos, ele também possui sensores externos capazes de auxiliar na locomoção do robô por meio da coleta de dados do ambiente, promovendo uma maior reconfigurabilidade e manobrabilidade do conjunto.

#### 2.4.4 Erekebot *Neke*

Esse módulo não é uma construção que traz diretamente elementos de extitdesign propostos nos módulos anteriores. Baseado em uma estrutura de prisma de base octogonal com abas laterais em formato de cruz, ortogonais uma a outra e dimensões aproximadas de

Figura 2.15 – Vistas do Erekebot VDM.

(a) Montagem teórica do módulo.



(b) Montagem do módulo.



Fonte: (GALEMBECK, 2018) e (ROCHA, 2023a).

150 × 80 × 80 mm, o módulo Neke busca implementar um esquema de conexão em série entre módulos com juntas obrigatoriamente alternadas entre *pitch* e *yaw*. Para alcançar os objetivos de comunicação e alimentação dos módulos, os seguintes componentes estão presentes na montagem de cada um dos módulos: um servomotor TowerPro MG995, um microcontrolador Arduino Mini, uma bateria 16340 para alimentação do circuito, uma IMU Digital Combo Board - ITG3200/ADXL345 e sensores infravermelho Sharp GP2Y0A41SK0F de curta distância para detecção de obstáculos, assim como um módulo Xbee 1mW Trace Antenna para comunicação intermodular sem fio. A partir desse módulo, trabalhos como (GOMES et al., 2023) foram feitos na simulação de movimentação desse robô em situações de busca e resgate aplicado à subida e descida de escadas com ou sem a presença de escombros. Em se considerando condições reais de montagem e de conexão entre módulos, é possível afirmar que o módulo descrito ainda não foi implementado com sucesso fora do ambiente de simulação. Testes anteriores revelaram dificuldades com o esquema de comunicação sem fio entre os módulos. A alimentação por baterias também se revela como um esquema de difícil implementação por conta do preço e tempo de uso de baterias de alta capacidade.

#### 2.4.5 Erekebot VDM

Apesar de possível nos módulos Erekebot  $\sigma$ , Erekebot  $\beta-5$  e Erekebot  $\alpha$ , a locomoção do tipo *yaw-yaw* ou *pitch-yaw* não apresentou resultados cinemáticos relevantes. Em sua concepção original, o Erekebot *Neke* também apresentava problemas de estabilidade. Dessa maneira, surge a família de módulos Erekebot VDM. Inicialmente, são propostos 3 tipos de módulo diferentes: VDM-Y e VDM-T para movimentação e transição; VDM-C para cauda e

---

cabeça. Outra vantagem desse tipo de módulo é sua capacidade de abrigar, em seu interior, estruturas e instrumentos de medição e controle adicionais, o que diversificaria as aplicações desse módulo para diferentes cenários. Já em seu exterior, seria possível conectar superfícies pré-fabricadas que mimetizariam a anisotropia de atrito confirmada em superfícies biológicas como as de cobras e outros animais rastejantes. Apesar de proposto em (GALEMBECK, 2018), a série VDM só foi implementada fisicamente no trabalho de (ROCHA, 2023a) e mesmo nesse caso não foi testada a locomoção de vários módulos interconectados em condições reais.

Nesse trabalho, estudou-se a influência de diferentes superfícies de atrito para o auxílio na locomoção *yaw-yaw* para um robô modular inspirado no módulo VDM-Y. O uso dessas superfícies é um tema central dentro do projeto de conjuntos modulares bioinspirados em cobras. Do ponto de vista da simulação de movimento, o trabalho de (GOMES, 2023) mostra o impacto da alteração dessas placas sobre a movimentação dos robôs em um plano horizontal bidimensional.

Conforme apresentado ao longo do capítulo, há um conjunto extenso de considerações e pontos que precisam ser analisados para a construção do mecanismo autônomo modular proposto. Em termos de manufatura, é necessário escolher a superfície do módulo que mais favoreça o tipo de locomoção desejada, assim como também é necessário escolher o mais adequado encapsulamento para os componentes internos do módulo. Dado o esquema de controle de juntas apresentado, é importante ponderar como ele poderia ser implementado fisicamente e quais instrumentos seriam necessários para tal tarefa, tanto a nível de controle, quanto a nível de alimentação do circuito eletrônico. Soluções anteriores forneceram estratégias guia para a resolução de tais questões, mas uma solução individual para o sistema proposto deverá ser implementada. Os passos e métodos utilizados para essa implementação e o que se espera obter a partir dela serão vistos no capítulo posterior.

## 3 Metodologia

O presente capítulo compila o conjunto de métodos, técnicas e estratégias adotadas para o desenvolvimento do mecanismo modular proposto. Ele se divide em Projeto Mecânico, Eletrônico e Controle Computacional. No primeiro, é apresentado o processo de definição das geometrias das propostas de módulos e uma descrição geral referente ao cálculo de torques máximos sobre o motor genérico. No segundo, são apresentados esquemas de conexão elétrica previamente realizados em trabalhos anteriores, com uma breve discussão de maneiras para avaliar qual das implementações é mais adequada para o esquema adotado. Por último, o terceiro expõe uma série de procedimentos sistemáticos que precisam ser implementados para o correto controle das juntas do robô. Passa-se pela escolha da placa PCA 9685, assim como pela definição de funções básicas e dos procedimentos para verificação de funcionamento e coordenação dos motores utilizados.

### 3.1 Projeto Mecânico

#### 3.1.1 Escolha dos motores

Para realizar o desenvolvimento de um novo robô modular, foi necessário definir, à partir do conjunto de peças disponíveis no inventário do Grupo *Ereko* da Universidade de Brasília, quais os motores mais adequados para serem usados conjuntamente em um mecanismo multiarticular. Por conta de trabalhos anteriores, como os desenvolvidos em (ROCHA, 2023a), em (GOMES, 2023) e em (GALEMBECK, 2018), os servomotores Micro Servo 9g SG90 TowerPro e e MG 995 TowerPro foram considerados. Suas informações principais podem ser vistas a partir da Tabela 3.2, feita com base nos documentos dos fabricantes (ETC, 2000) e (TOWERPRO, 2014). O primeiro é um modelo de tamanho reduzido e torque baixo. O segundo é um modelo mais robusto, de maiores dimensões e maior torque. Por conta de sua maior robustez e também da disponibilidade prévia de 12 motores funcionais, o segundo modelo foi escolhido para servir de base para o desenvolvimento do invólucro com o qual ele formará os módulos desejados do protótipo robótico. A escolha dos motores irá definir, como apresentado posteriormente, a geometria dos invólucros, naquilo que, após a montagem, constituirá um módulo. O módulo em questão, por simplicidade de construção, abrigará somente um motor, ou seja, contendo somente um grau de liberdade rotacional.

#### 3.1.2 Projeto dos módulos auxiliado por computador

Uma vez escolhido o motor que será utilizado, faz-se necessário construir um invólucro que permita tanto o bom posicionamento e fixação do motor em seu interior, formando

Tabela 3.2 – Quadro com resumo de dados para os servomotores considerados

	Motores	
	SG-90	MG 995
Massa [g]	9	55
Dimensões [mm]	22 × 12 × 31	41 × 20 × 43
Torque max.[N.m]	0,177	0,834
Velocidade angular [ rad/s]	10,472	5,236
Tensão de operação [V]	4.8	[4,8 ; 7,2]
Engrenagem	plástico	metal

Fontes: (TOWERPRO, 2014) e (ETC, 2000).

um módulo funcional, assim como a interconectividade e intercambiabilidade entre unidades modulares semelhantes.

Para alcançar tais requisitos, é importante que se escolha uma ferramenta de Projeto auxiliado por computador (CAD) que consiga modelar parametricamente peças de diferentes e complexas geometrias, com uma ampla biblioteca de materiais pré instalada, com capacidades de realização de simulações numéricas de esforços mecânicos, de dinâmica de mecanismos e de documentação via desenhos técnicos. Também é importante que essa escolha seja robusta à passagem do tempo e à troca de integrantes que irão trabalhar em projetos semelhantes, garantindo uma redução da curva de aprendizado e uma padronização, enquanto for viável e conveniente, das práticas de modelagem, documentação e armazenamento de informações no escopo da Universidade de Brasília.

Uma vez escolhida a ferramenta de projeto a ser utilizada, procede-se para um processo iterativo de modelagem visando a construção de um invólucro que permita tanto a movimentação do mecanismo em meio à toda a fiação e peças embarcadas, como também a proteção e resistência mecânica do módulo perante às condições ambientais e também aos esforços mecânicos realizados durante seu movimento. Nessa etapa, é mais importante definir as características principais ou *features* do modelo do que necessariamente as dimensões finais dele. Isso é possível por conta da natureza do software de modelagem: paramétrico. Por conta desse fator, é possível criar relações entre as dimensões da peça, de modo que, ao alterar uma delas, todas as dimensões relacionadas a esta mudam de forma proporcional conforme regras impostas pelo próprio projetista.

Finalizada a parte de projeto do módulo, é necessário verificar se ele atende aos requisitos desejados. Se mais de um módulo passar por esse crivo, aquele escolhido será o que apresentar o melhor conjunto de características dentro da comparação, ou seja, o módulo que apresente a melhor proporção entre resistência mecânica, peso compatível com o torque dos motores, área útil de trabalho dos motores, facilidade de fabricação ou manufaturabilidade, facilidade de armazenamento, segurança operacional, entre outros

critérios que podem ser levados em conta de acordo com a natureza das peças comparadas. Quando finalmente o módulo final for escolhido, suas dimensões precisarão ser adequadas para concordarem com as restrições de torque dos motores adotados. Caso seja possível adequar as medidas para concordarem com as limitações tecnológicas do projeto, o módulo pode ser fabricado.

### 3.1.3 Cálculo dos torques em um motor genérico

Conforme descrito nos trabalhos de (SOUSA, 2014) e (GOMES, 2023) é importante que o projeto do módulo leve em conta que, para condições mínimas de operação, um motor deve ser capaz de conseguir movimentar pelo menos 2 outros módulos completos, incluindo dentro do módulo toda a fiação, o motor e qualquer outra peça necessária para seu movimento. Para a grande maioria dos materiais convencionais, o coeficiente de atrito de Coulomb entre ele e uma superfície qualquer é menor do que 1, o que faz com que, em uma superfície completamente horizontal, na qual a força de reação normal é igual à força peso, as forças e torques resultantes em qualquer junta decorrentes da força peso sejam sempre menores do que aquelas decorrentes do atrito entre o corpo do robô e a superfície na qual ele está, logo se um motor em configuração *pitch* conseguir erguer 2 módulos do solo na configuração de maior esforço possível para o motor (2 módulos colineares saindo da posição de equilíbrio horizontal), então o motor de mesmo modelo posicionado em *yaw* também conseguirá realizar a movimentação desejada.

Conforme exibido em (HIBBELER, 2017, p. 166), os esforços atuantes externamente sobre um corpo podem ser substituídos por um sistema de esforços equivalente calculados relativamente a um ponto do espaço, desde que seu efeito sobre o corpo analisado seja o mesmo do conjunto de esforços externos anteriores previamente representados e/ou atuantes sobre o corpo. Assim, o procedimento de cálculo dos torques pode ser simplificado se for possível reduzir toda a distribuição de massa em torno do módulo para um único ponto: o seu centro de massa. Considerando um cenário no qual o campo gravitacional seja aproximadamente uniforme, pode-se considerar o centro de massa (CM) como sendo igual ao centro de gravidade (CG). Dessa forma, ao invés de se calcular os torques para cargas distribuídas com diferentes densidades de força para cada uma das peças do módulo, pode-se calcular numericamente, via o software de projeto mecânico escolhido, a posição do centro de massa do módulo. Ao se obter a posição do centro de massa, é possível realizar os cálculos posicionando toda a força peso do bloco atuando somente sobre o centro de massa do corpo.

Pela natureza proposta das juntas do mecanismo, a análise de torques será feita no caso bidimensional. Considere as seguintes dimensões para o cálculo dos torques sobre o motor genérico:  $d_1$  representa a distância do eixo do motor até o centro de massa de seu próprio módulo;  $d_2$  representa a distância do eixo do motor analisado até o centro de massa do primeiro módulo levantado, com exceção do módulo que contém o motor e  $d_3$  representa

a distância do eixo do motor até o centro de massa do segundo módulo externo ao motor. Para módulos iguais de massa  $m$  e um torque máximo de  $\tau_{max}$ , o cálculo de torques para o sistema modular pode ser resumido pelas equações [Equação 3.1](#) e [Equação 3.2](#). A primeira representa o cálculo genérico de torques para módulos de mesma massa poderem ser movimentados pelo motor e a segunda explicita a massa em função dos parâmetros limitantes: torque máximo e distâncias entre eixo e centros de massa. Vale notar que a segunda equação pode ser rearranjada considerando a própria massa como um fator limitante, a depender dos objetivos do projeto.

$$\sum \vec{M}_i \geq 0 \Rightarrow \tau_{max} \geq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = m \cdot g \cdot (d1 + d2 + d3) . \quad (3.1)$$

$$m \leq \frac{\tau_{max}}{g \cdot (d1 + d2 + d3)} . \quad (3.2)$$

## 3.2 Projeto Eletrônico

Para inserir toda a eletrônica embarcada do protótipo é importante procurar quais soluções são possíveis e ainda mais, quais soluções são factíveis dentro do orçamento e do tempo de execução considerados. Esses 3 pilares : possibilidade, custo e tempo serão os norteadores do desenvolvimento do projeto.

Os requisitos básicos do projeto eletrônico podem ser descritos da seguinte forma. 12 servomotores precisam ser atuados, possivelmente em condições máximas de operação e com corrente de *stall* conhecida de 1,2 A cada por meio de seu *datasheet* em (ETC, 2000). Cada servomotor é controlado por 1 fio de sinal, e 2 de alimentação: **Vcc**, por convenção representado com cor vermelha, e **Gnd**, por convenção, de cor preta. Para controlar 12 motores, 12 fios de sinal de modulação de largura de pulso (PWM), por convenção, de cor amarela ou laranja, são necessários. Para controlar 12 fios PWM, 12 portas PWM independentes precisam existir no controlador.

Por conta da disponibilidade prévia de microcontroladores da família Arduino dentro do grupo *Ereko*, da grande e ativa comunidade de programação e do amplo espectro de problemas resolvidos com essa família de microcontroladores, um controlador da família Arduino será escolhido como o controlador principal. No entanto, a maioria dos controladores dessa família não possui nativamente 12 portas PWM disponíveis. Por conta disso, faz-se necessário o uso da placa PCA 9685 que é capaz de expandir a quantidade de portas PWM de um microcontrolador através do protocolo I<sup>2</sup>C de comunicação. Dessa maneira, por meio de 2 pinos: **SCL** para *clock* e **SDA** para dados, pode-se controlar até 16 portas PWM independentes com essa placa.

Figura 3.16 – Montagem eletrônica centralizada na placa PCA 9685.



Fonte: o Autor.

Uma vez definido o problema, há algumas alternativas capazes de solucionar a questão. Para que essas alternativas possam ser exploradas tanto nas nuances de conexões elétricas ponto a ponto quanto também em seu aspecto de montagem física, as figuras a seguir nessa seção, especificamente [Figura 3.16](#), [Figura 3.17](#) e [Figura 3.18](#) contém diagramas de montagens simplificadas para um conjunto de 4 motores. Nelas, a cor vermelho é usada para fios do tipo **Vcc**, fios pretos para o tipo **Gnd** e fios de cor laranja para os sinais de controle. O controlador e a placa de expansão de conexões PWM foram compactadas em um bloco chamado de Sistema de Comando. A representação da fonte de alimentação nesses diagramas foi abstraída, para dar ênfase no efeito da escolha de cada uma das conexões elétricas sobre o resultado final da montagem do conjunto.

A alternativa 1, exposta na [Figura 3.16](#) propõe um esquema de alimentação distribuída entre os motores. Nela, cada motor tem 3 fios individuais que se direcionam para a placa PCA 9685. Os materiais necessários para sua execução podem ser elencados em:

- 1 controlador Arduino Uno R3;
- 1 placa PCA 9685;
- 12 servomotores com fios estendidos;
- 1 fonte de alimentação cabeada de saída em corrente contínua;

Em virtude do tamanho do encadeamento de módulos, cada conjunto de fios associado a um dos motores precisa ser necessariamente estendido, uma vez que a distância padrão de fábrica de 30 cm não é suficiente em geral, quando se considera o tamanho de um módulo ou mais módulos do protótipo a ser construído. Essa estratégia promove a facilidade de troca e manutenção nos motores, garantindo também uma fixação mais fácil dos fios

na placa PCA 9685. Por outro lado, para  $n$  motores, há  $3n$  fios, o que aumenta a massa que está conectada a cada motor, além de possivelmente dificultar a passagem dos fios pelos furos passantes nas caixas dos motores. Uma última dificuldade desse esquema de conexão é que como todo o controle e fornecimento de energia fica centrado sobre a placa PCA, cuja corrente máxima é de 8 A, conforme (NXP, ), caso a corrente total necessária para os motores seja maior que o limite da placa, pode haver falha elétrica e dano ao projeto como um todo.

A alternativa 2 pode ser implementada de 2 formas, conforme descrito nos diagramas simplificados de [Figura 3.17](#) e [Figura 3.18](#). Para sua execução, há a seguinte lista de materiais:

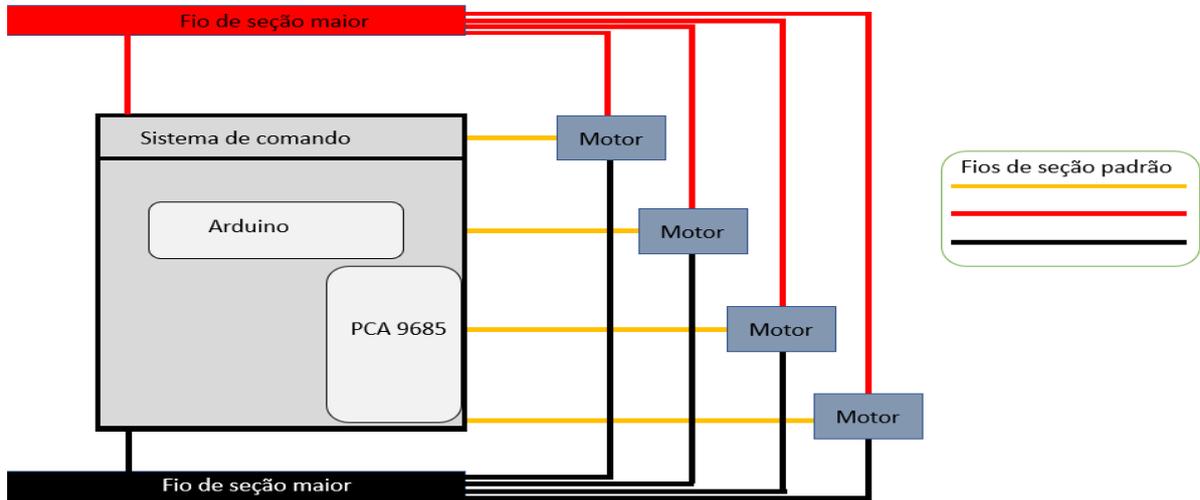
- 1 controlador Arduino Uno R3;
- 1 placa PCA 9685;
- 12 servomotores com fios estendidos;
- 1 fonte de alimentação cabeada;
- fios de área de seção transversal  $1,5 \text{ mm}^2$  e 22 AWG.

Para além das conexões elétricas, o que é mais importante nessas imagens é a representação visual das duas maneiras em que a derivação das conexões elétricas de alimentação pode ser realizada e o seu impacto geral sobre a massa do conjunto. Os fios abstraídos na representação das montagens, especialmente aqueles que ligam o controlador até a placa de expansão de sinais, tem massa desprezível em relação aos fios de alimentação e formam o conjunto mínimo de fios para o esquema de controle da placa proposto. Estes fios aqui desprezados serão discutidos posteriormente em maior detalhe em [Capítulo 4](#).

De forma geral, a alternativa 2 busca impor um esquema de comando que centralize na placa preferencialmente só os sinais de controle PWM de baixa corrente, reduzindo sobre ela qualquer chance de falha por sobrecorrente. A primeira implementação dessa estratégia é exibida na [Figura 3.17](#) e centraliza as conexões de fios de alimentação na base do robô. Dessa forma, os fios de alimentação **Vcc** e **Gnd** de mesma área de seção do caso anterior passam a ser alimentados diretamente pela fonte, sem a necessidade de passar pela placa PCA9685 para isso. Dessa forma, a limitação de corrente imposta pela alimentação centralizada na placa deixa de acontecer, porém a grande quantidade de fios ainda continua presente.

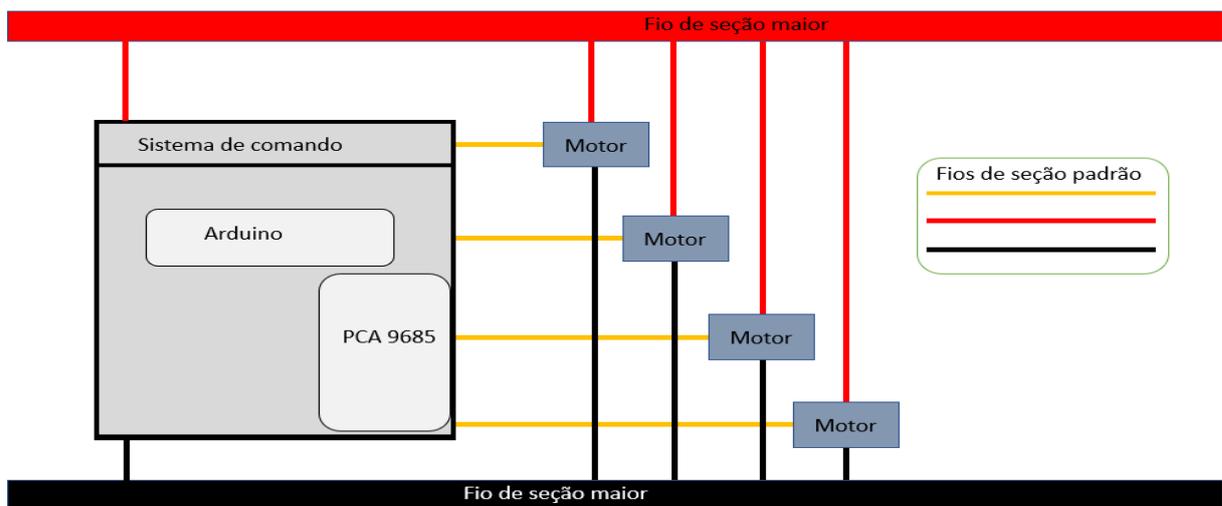
A segunda implementação da estratégia 2 se baseia na passagem de 2 fios de alimentação por dentro da estrutura do sistema robótico. A partir desses fios, as conexões elétricas podem ser feitas mais próximas aos respectivos motores. Para isso, é necessário que existam fios **Vcc** e **Gnd** de área de seção transversal mais grossa, a partir dos quais serão derivados fios menores para cada um dos motores. Essa alternativa possivelmente reduz a massa dos fios sobre o motor e, para  $n$  motores, gera  $n + 2$  fios de comprimento longo com  $n$  fios de comprimento muito menores que a soma dos comprimentos dos outros considerados

Figura 3.17 – Primeira implementação da alternativa 2.



Fonte: o Autor.

Figura 3.18 – Segunda implementação da alternativa 2.



Fonte: o Autor.

previamente. Assim, essa implementação melhora os problemas de excesso de corrente e de excesso de massa.

Outra alternativa a ser considerada é um caso similar ao proposto em (ROCHA, 2023a) em que o controle de cada módulo é realizado por um controlador dedicado, com possivelmente alimentação por baterias, evitando assim a passagem de fios entre módulos adjacentes. Para  $n$  módulos, seriam necessários  $n$  controladores e  $n$  motores. Sob a razoável hipótese de que o controlador escolhido terá acesso a pelo menos uma porta PWM dentro de sua estrutura, o comando de seu respectivo motor pode ser alcançado.

Esse caso, apesar de possível, faz uso de baterias, o que pode limitar o tempo de uso do produto e introduzir gastos com recarga e processos cíclicos de montagem e desmontagem da estrutura do conjunto robótico. Para além dessas preocupações, a movimentação de um servomotor em condições máximas de operação exige uma bateria de alta capacidade. A implementação de uma estratégia como a terceira é dependente da disponibilidade de baterias de alta capacidade e de um número elevado de microcontroladores. Caso esses itens não existem previamente no inventário da equipe *Ereko*, sua viabilidade fica comprometida.

### 3.3 Controle via Computador

O objetivo geral do projeto computacional é conseguir comandar adequadamente as juntas do sistema mecatrônico mediante alguma estratégia de controle. Uma estratégia clássica é a utilização da cinemática inversa e cinemática direta para planejamento e execução de trajetórias. Apesar de possível, a aplicação de cinemática inversa em um mecanismo redundante apresenta desafios quanto à limitação por parte da escolha dos ângulos. Como a real movimentação do robô também depende do seu modelo dinâmico e este não é amplamente discutido no presente trabalho, a estratégia cinemática utilizada será a dos CPGs simplificados na forma de osciladores senoidais discretos, conforme explicado pelas Equações [Equação 2.24](#), [Equação 2.25](#). Conforme descrito ao longo do projeto mecânico e eletrônico, há diversas formas de implementar o controle a nível de circuitos. Da mesma maneira, há várias maneiras de se implementar o controle computacional a nível de algoritmos.

Ao usar controladores descentralizados, cada um dedicado ao seu motor respectivo dentro do módulo, opta-se por um projeto que minimiza a quantidade e massa de fios entre módulos, sob o risco de custo monetário excessivo na compra de múltiplos controladores e de dificuldades de sincronização entre os diversos módulos. Outra alternativa é o controle centralizado em somente um computador, mediado ou não por uma placa auxiliar. Como explicado anteriormente, o esquema adotado será o de um controlador da família Arduino, conectado à placa PCA9685 para comando de 12 servomotores. A natureza da placa faz com que o processo de controle seja sequencial, de modo que somente um motor pode ter seu estado alterado por vez. Alterações consequentes necessitam de um tempo de espera fixo a

ser determinado de acordo com a interface entre placa e controlador. Desrespeitar o tempo mínimo entre 2 transições de estado pode levar a comportamento inadequado do sistema.

Após determinação desse tempo mínimo entre as atuações, é importante conferir se cada um dos motores é efetivamente atuado quando comandado e, caso seja, se sua resposta real corresponde, dentro de uma margem de incerteza, ao valor desejado. Para que essa determinação seja bem sucedida, é importante confirmar qual a extensão do intervalo útil de períodos de pulso PWM para o conjunto de motores. Isso é feito a partir do cálculo teórico dos pulsos máximos e mínimos descritos no *datasheet* do motor em (ETC, 2000).

Para cada motor, se inicia seu comando com o valor mínimo teórico de largura de pulso e verifica-se se o motor não apresenta ruído excessivo ou qualquer outro indicativo de que seu funcionamento está prejudicado. Caso no limite inferior o motor apresente ruído, deve-se aumentar a largura do pulso mínimo até que o ruído suma. A largura na qual o motor para de apresentar ruído passa a ser o novo limite inferior. Da mesma maneira, para o mesmo motor, inicia-se o teste com o limite superior teórico definido pelo *datasheet*. Caso ao se atuar o motor nessa largura de pulso, este apresente vibração ou ruído excessivo, reduz-se a largura do pulso até que não haja mais esse efeito. O valor de largura de pulso no qual deixe de acontecer esses eventos indesejados passa a ser o novo limite superior de atuação do motor.

De maneira exatamente análoga, se repete esse procedimento para todos os 12 motores. Ao final do procedimento, a largura de pulso mínima será o maior valor das larguras mínimas individuais. A largura máxima será o menor valor dentro das larguras mínimas individuais. Dessa forma, consegue-se garantir que nenhum dos motores apresentará problemas de ruído de ou extrapolação de zona de trabalho. A definição dessas zonas de atuação é necessária por conta da escolha da biblioteca Adafruit PWM para mediar o controle dos motores por meio de uma interface I<sup>2</sup>C encapsulada. Nessa biblioteca, é necessário definir esses 2 extremos de largura de pulso. A partir desses valores, pode-se fazer um mapeamento linear ou não entre as larguras de pulso e os ângulos aos quais eles correspondem nos servomotores.

Para melhorar esse mapeamento, deve-se levar em conta que cada um dos servomotores tenha um intervalo real de movimentação diferente do previsto pelo fabricante de 180 graus. Para determinar a extensão do intervalo útil, aplica-se o comando de máxima largura para cada motor e calcula-se, pelo aparato de calibração presente na [Figura 3.19a](#) e [Figura 3.19b](#), a posição angular. Depois, pega-se o menor valor angular do conjunto e fixa-se ele como o máximo do conjunto, evitando qualquer comportamento indesejado resultante da tentativa de alcançar uma posição fisicamente proibida para o motor.

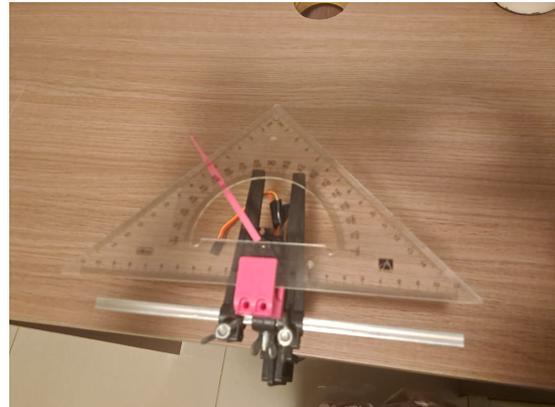
Definido as características principais do motor, pode-se procurar calibrar os motores de forma refinada. Considere ao longo desse trabalho que o procedimento de calibração seja definido como o mapeamento realizado através de um modelo matemático que associa

Figura 3.19 – Aparato de calibração dos motores.

(a) Vista Lateral do aparato de calibração.



(b) Vista Lateral do aparato de calibração.



Fonte: o Autor.

individualmente uma largura de pulso para uma posição desejada. Como há 4096 larguras de pulso para um canal PWM de 12 bits, conforme (ETC, 2000), fazer o mapeamento de cada um dos valores para seu ângulo correspondente seria inviável temporalmente para 12 motores. O que pode ser praticado, caso seja necessário refinar a precisão dos motores é, mapear um conjunto de aproximadamente 30 pontos do modelo teórico resultante de um mapeamento anterior para 30 ângulos reais mapeados pelo dispositivo de calibração. Essa calibração para redução das incertezas, apesar de útil, só será feita caso haja tempo e viabilidade para tal, uma vez que o modelo cinemático escolhido não tem alta sensibilidade a essa incerteza angular. Dessa forma, uma curva serpenoide de fase  $\phi$ , será muito semelhante a uma curva de fase  $\phi + t$  desde que  $t$  seja pequeno.

Inicialmente, define-se qual o tamanho do vetor que irá conter os ângulos de junta definidos pelas equações da onda serpenoide. Para a criação da onda serpenoide, como cada junta é atuada com um conjunto próprio de ângulos, uma estratégia possível é a criação de uma matriz de ângulos em que cada linha representa um motor e cada coluna um momento no tempo. As dimensões da matriz e a forma como os ângulos de distribuem nela irão determinar a cinemática do mecanismo, o que pode ser configurado pelo usuário. Para facilitar a interface entre o programador e a biblioteca, criou-se a função *atua\_motor* que permite atuar o motor desejado indicando somente o número da porta e o ângulo desejado. Para saber qual porta está conectada a qual motor, foram definidas 2 listas de pinos para os respectivos motores em orientação *pitch* e *yaw*, na ordem em que eles são fisicamente posicionados dentro do robô. Após a geração dos ângulos, será avaliado qualitativamente se o conjunto robótico proposto consegue fazer a locomoção desejada para cada um dos tipos de movimento testados. Em termos quantitativos, também será feita uma breve análise da influência de cada um dos parâmetros da Equação 2.24 e Equação 2.25 sobre os deslocamentos  $\Delta X$  no sentido cauda para cabeça e  $\Delta Y$  no sentido ortogonal ao anterior, considerando

um plano horizontal de suporte para a locomoção.

Conforme descrito ao longo do capítulo, a metodologia adotada separa as etapas do projeto dentro de três grandes eixos temáticos: o Projeto Mecânico, o Projeto Eletrônico e o Controle Computacional. No primeiro, foi apresentada uma metodologia de escolha dos motores e de cálculo de torques, assim como o procedimento comparativo de projeto dos módulos. No segundo projeto, foi exposta a metodologia de dimensionamento elétrico e um esquema comparativo entre diferentes implementações da instrumentação dos módulos. Por último, no Controle Computacional, foi apresentada uma metodologia de habilitação e controle dos motores utilizados, a definição do protocolo de comunicação e da resolução angular dos motores a partir desse protocolo, com uma breve descrição da análise de movimentação do robô. A partir do conjunto de métodos expostos, serão avaliados, no próximo capítulo, os resultados para cada uma das partes separadas do projeto, mas também do protótipo final como um todo.

## 4 Resultados

O presente capítulo aborda, de maneira análoga ao que foi descrito na [Capítulo 3](#), os resultados dos procedimentos adotados nos três eixos temáticos definidos ao longo do trabalho: Projeto Mecânico, Eletrônico e Controle Computacional. Dentro do Projeto Mecânico, são comparadas três propostas de módulos em termos de viabilidade econômica, facilidade de fabricação, facilidade de intercâmbio de peças e facilidade de integração com a instrumentação eletrônica e o controle computacional. Já dentro do Projeto Eletrônico, as propostas abordadas durante a metodologia culminam na escolha de um esquema de montagem. Esse esquema é dimensionado de acordo com os requisitos dos aparelhos utilizados e as vantagens e desvantagens dele sobre as outras partes da construção do mecanismo são salientadas. Por último, o Controle Computacional aborda a implementação das rotinas e procedimentos definidas na metodologia, englobando testes de repetibilidade dos motores, coordenação entre motores e finalmente, testes qualitativos e quantitativos de movimentação do robô dentro de um ambiente controlado na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT-UnB).

### 4.1 Projeto Mecânico

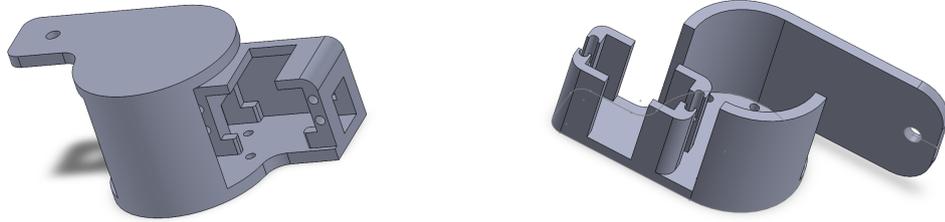
Em virtude do conjunto de requisitos explicitado na [subseção 3.1.1](#), foi adotado o software SolidWorks para realização de toda a modelagem paramétrica 3D das peças desejadas. Além de possuir todas as capacidades supracitadas, atualmente a Universidade de Brasília possui computadores licenciados para o uso dessa ferramenta, de modo que optar por ela une tanto uma necessidade de modelagem com a conveniência de já possuir a ferramenta disponível em computadores acessíveis. É importante ressaltar que existem outras ferramentas igualmente capazes de realizar o processo de modelagem e simulação e que resultados semelhantes podem ser obtidos com quaisquer uma delas, desde que cada uma atenda aos requisitos necessários para o projeto.

#### 4.1.1 Primeiro módulo

Visando manter o legado da produção anterior desenvolvida em trabalhos semelhantes em ([ROCHA, 2023a](#); [GALEMBECK, 2018](#)) e ([GOMES, 2023](#)), a primeira proposta de módulo buscava adaptar um mecanismo de configuração única *yaw-yaw* para um mecanismo com 2 módulos. Conforme mostrado na [Figura 4.20a](#), um deles abrigaria um motor em orientação *pitch* e uma conexão do tipo *yaw* e conforme mostrado na [Figura 4.20b](#) o outro, pelo contrário, abrigaria um motor em orientação *yaw* e uma conexão do tipo *pitch*. A concatenação alternada entre os dois tipos de módulos gera um sistema modular do tipo

Figura 4.20 – Duas versões da primeira proposta de módulo para o mecanismo final.

- (a) Primeiro Módulo de motor *pitch* e conexão *yaw*.      (b) Primeiro Módulo de motor *yaw* e conexão *pitch*.



Fonte: o Autor.

Figura 4.21 – Vistas Isométrica e Lateral da primeira proposta de robô modular.

- (a) Primeira proposta de robô modular com módulos alternados.      (b) Vista lateral da primeira proposta de robô com módulos alternados.



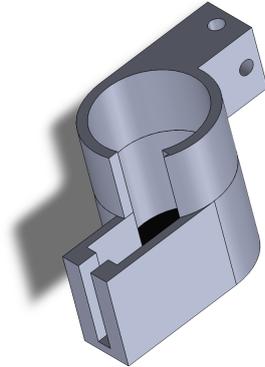
Fonte: o Autor.

cobra com juntas *pitch* e *yaw* alternadas, permitindo os modos de locomoção descritos dentro das limitações geométricas dos módulos. A [Figura 4.21a](#) mostra um robô com 4 módulos conectados. A partir dela, é possível perceber que, geometricamente, o movimento *pitch-yaw* desejado poderia ser obtido, pois há espaço tanto para o movimento relativo dos elos, assim como também espaço para fixação da junta na respectiva aba adjacente.

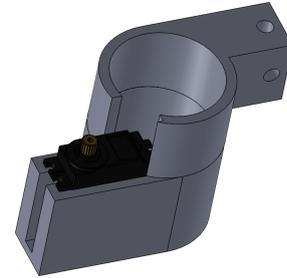
Caso se optasse por um esquema de conexões elétricas descentralizado, por meio de baterias dedicadas para cada módulo e cada motor sendo atuado por um controlador também dedicado, o qual, em conjunto com seus pares em outros módulos seria sincronizado de forma sem fio através de uma estratégia *peer to peer* ou centralizado em um controlador mestre, os módulos reunidos em conjunto poderiam formar um protótipo funcional. No entanto, caso se julgue o esquema sem fio entre módulos como inadequado ou demasiadamente custoso

Figura 4.22 – Segunda proposta de módulo para o protótipo final.

(a) Invólucro *pitch-yaw* para o servomotor do 2º módulo.



(b) Segundo módulo *pitch-yaw* já com motor posicionado.



Fonte: o Autor.

em termos monetários, seja por suas dificuldades inerentes de armazenamento de energia ou de sincronização dos computadores, uma outra opção possível seria usar fios entre os módulos para realizar o comando de cada um dos motores.

Caso a transmissão de energia ou de informações entre os módulos seja realizada através de fios físicos, a proposta do primeiro módulo apresenta alguns problemas de concepção em termos de durabilidade das conexões e de confiabilidade na movimentação correta. A grande quantidade de espaços abertos se, por um lado facilitam as conexões elétricas e permitem uma visualização completa do funcionamento do sistema mecatrônico, por outro acabam expondo demasiadamente os elementos internos do conjunto para condições ambientais, as quais, na grande maioria das situações em que um robô desse tipo seria utilizado, acabariam afetando negativamente o funcionamento do módulo. Caso acidentalmente um ou mais desses fios se desprenda da superfície na qual ele estava previamente fixado, esse fio poderia se enrolar no corpo do próprio mecanismo ou em outras superfícies do ambiente, gerando danos ao robô tanto em nível de estrutura quanto de tarefa.

Por último, conforme mostra a [Figura 4.21b](#), o robô em posição de descanso (ângulos de junta mantidos em  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ) não mantém todas suas partes fixadas ao solo o que gera assimetrias na geometria do módulo. Essas assimetrias não são, em si, um problema, mas para a reutilização do modelo desenvolvido no presente trabalho para servir como plataforma de estudo para trabalhos posteriores é desejável que o módulo apresente a maior regularidade superficial, simetria e facilidade de manuseio possível, o que se reflete em um conjunto de módulos que, quando conectados, tocam igualmente a sua superfície de contato.

Figura 4.23 – Segunda proposta de módulo para o protótipo final.

- (a) Vista isométrica do mecanismo, em repouso, (b) Vista do conjunto construído pelo 2º módulo  
construído a partir do 2º módulo. com juntas atuadas



Fonte: o Autor.

#### 4.1.2 Segundo módulo

O segundo módulo surge com o objetivo de senão resolver, ao menos melhorar algumas das deficiências constatadas no primeiro módulo: pouca cobertura para uma possível fixação entre módulos e a necessidade de existência de 2 módulos diferentes para desempenho da locomoção no plano vertical (*pitch*) e locomoção no plano horizontal (*yaw*). Essas melhorias no entanto, ainda buscam manter o legado dos robôs produzidos em (ROCHA, 2023a; GALEMBECK, 2018; GOMES, 2023).

Dessa maneira, conforme a Figura 4.22a e também a Figura 4.22b, surge o módulo único 2. Em comparação com o módulo anterior, o segundo mantém a estrutura cilíndrica central, porém a expande em altura; também é mantido o posicionamento da caixa que encapsula o respectivo motor, mas aquilo que antes era uma aba somente para conexões ou uma aba somente para conexões *yaw*, agora se torna uma aba multiuso, com encaixes tanto na posição *pitch* quanto na posição *yaw*, por meio de furos perpendiculares sobre a mesma matriz em forma de paralelepípedo. A fixação do motor ao seu invólucro é feita por meio de interferência, mas há espaço para a fixação via parafusos de maneira complementar.

Esse arranjo estrutural ou particular escolha de *features* promove a intercambialidade e a modularidade do projeto na medida em que, um módulo de motor *pitch* e conexão *yaw* pode se tornar um módulo de motor *yaw* e conexão *pitch* por meio de uma simples rotação de 90° em sua estrutura. A proteção de uma possível fixação que transponha os módulos é parcialmente resolvida no interior dos módulos com a inserção de novas paredes, porém, na interface de conexão entre o eixo do motor e a aba de fixação *pitch/yaw*, os fios ainda ficariam possivelmente expostos à condições ambientais mais adversas, como presença de galhos, escombros pontiagudos e outras entidades rígidas ou cortantes capazes de danificar o mecanismo modular internamente.

Figura 4.24 – Vista lateral do robô construído a partir do 2º módulo.



Fonte: o Autor.

Conforme mostrado pela [Figura 4.23b](#), o robô construído pela conexão alternadas dos segundos módulos também configura um modelo viável de conjunto móvel modular *pitch-yaw* conseguindo se mover dentro da região angular definida por sua própria geometria. Pela [Figura 4.23a](#), a altura do centro cilíndrico limita o ângulo das juntas. Quanto maior a altura, menor é a amplitude angular da junta em questão.

No entanto, quando considerada uma vista lateral do sistema, como a proposta pela [Figura 4.24](#), é possível notar que a alternância entre módulos acaba gerando um efeito indesejado de distribuição desigual de massa e de falta de apoio na posição de descanso do conjunto mecatrônico (ângulos de 0 ou 90°). Não é objetivo desse trabalho comprovar a existência ou buscar uma relação ótima entre as dimensões do módulo de forma que a questão dos apoios seja resolvida, pois essa solução também deveria levar em conta o esquema de conexões elétricas e todas as dimensões das peças a serem posicionadas no interior do sistema mecatrônico. À priori, também não se sabe quão robusta e adaptável seria essa solução no caso de uma possível troca de peças: problema frequente em projetos reais, seja por defeito ou por indisponibilidade de mercadoria.

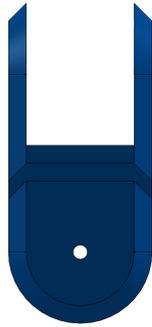
Se considerado um esquema eletrônico sem fio, este modelo de sistema mecatrônico tem a capacidade de performar de maneira até melhor do que o caso anterior, especialmente por promover uma melhor proteção da estrutura interna dos módulos. Essa melhoria, no entanto, vem inevitavelmente às custas de maiores dificuldades de manutenção e/ou trocas de componentes nos módulos. Por outro lado, caso se escolha um esquema de passagens de fios físicos para controle e/ou alimentação dos módulos, apesar da melhor proteção no interior, a interface entre motor e aba ainda ficaria exposta a riscos, como no caso anterior.

### 4.1.3 Terceiro Módulo

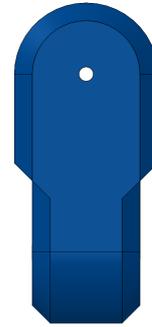
O Terceiro módulo surge da necessidade de manter as melhorias de módulo único, proteção e encapsulamento dos motores, facilidade de fabricação já desenvolvidos nos

Figura 4.25 – Vistas principais do robô modelo.

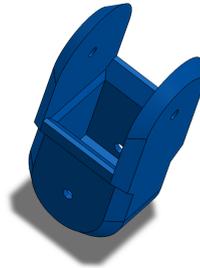
(a) Vista frontal.



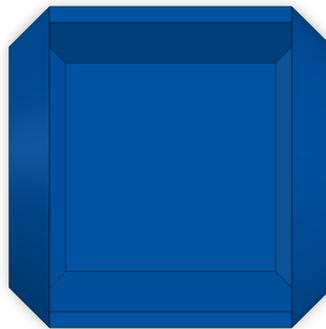
(b) Vista lateral esquerda.



(c) Vista especial.



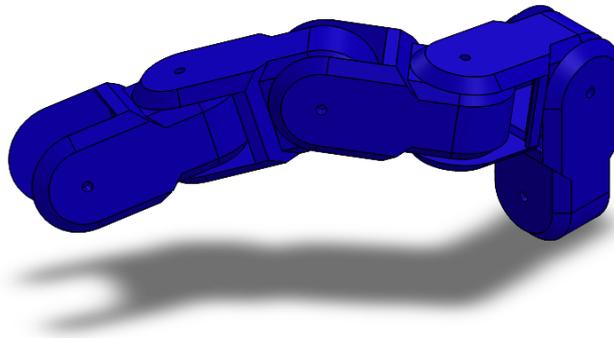
(d) Vista superior.

Fonte: [Link](#).

modelos anteriores, mas além disso, também resolver os problemas de assimetria e de exposição excessiva ou danosa de possíveis fios ainda presentes nas tentativas prévias, o terceiro módulo não procura inspiração nos modelos de (ROCHA, 2023a) e (GALEMBECK, 2018), mas sim em um modelo de acesso aberto disponível no [Link](#).

O modelo de inspiração contém somente um módulo, que se conecta aos seus semelhantes usando a mesma lógica de juntas *pitch* e *yaw* alternadas decorrente da rotação de  $90^\circ$  de um módulo relativamente ao outro. Porém, ao contrário do módulo 2, ele não possui

Figura 4.26 – Montagem final do robô modelo.



Fonte: <<https://grabcad.com/library/multibracket-snake-robot-1>>.

problemas de assimetria, fazendo com que, na posição de repouso, partes iguais de todos os módulos fiquem em repouso ao mesmo tempo. Isso só é possível por conta de uma relação dimensional imposta ao mecanismo. Para descrevê-la, é necessário considerar as principais *features* do modelo de inspiração. Conforme [Figura 4.25d](#) e [Figura 4.25c](#), é possível perceber que o modelo é composto de um paralelepípedo e 2 abas laterais. Conforme vista lateral do módulo na [Figura 4.25b](#) percebe-se que o comprimento e a altura das abas laterais é a mesma.

Da mesma maneira, pela [Figura 4.25a](#) é possível notar que a altura do paralelepípedo é igual à largura entre as abas laterais vistas pelo plano superior. A primeira relação garante uma peça de seção quadrada simétrica relativamente a rolagem sobre o eixo longitudinal do robô cobra estendido ou em descanso. A segunda relação garante o encaixe entre os módulos alternados de robusta, garantindo resistência contra flexão e outros tipos de esforços considerados.

No entanto, conforme mostrado na [Figura 4.25d](#) e [Figura 4.25c](#) esse modelo não considera em sua construção a existência de um motor dentro da caixa no formato de paralelepípedo, o que o torna inviável para manufatura da maneira como ele atualmente se apresenta. Apesar dessa característica, a [Figura 4.26](#) mostra como seria uma montagem com

Figura 4.27 – Terceira proposta de módulo para o protótipo final.

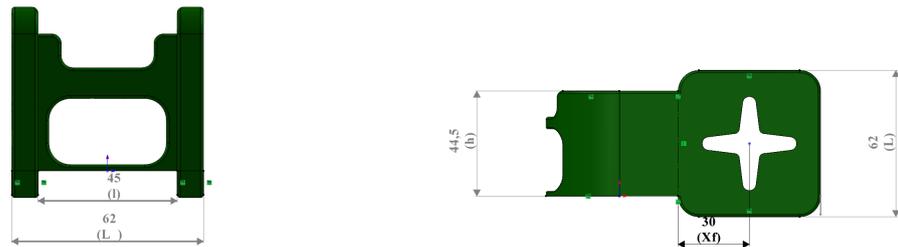
(a) Vista isométrica do 3º módulo sem motor. (b) Vista isométrica do 3º módulo com motor.



Fonte: o Autor.

Figura 4.28 – Vistas principais do 3º módulo.

(a) Vista frontal cotada. (b) Vista lateral esquerda cotada.



Fonte: o Autor.

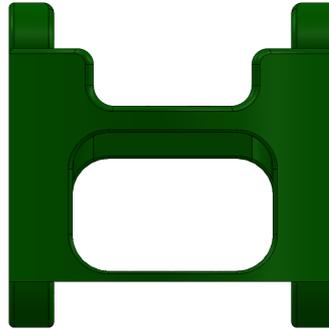
esses módulos de referência, a qual pode ser usada em simulações, mesmo desconsiderando a presença de um motor em seu interior.

A partir desse modelo, surge o módulo 3. De maneira geral, conforme mostrado na [Figura 4.27a](#), as 3 *features* principais se mantêm. As principais alterações surgem para compatibilizar a presença de um motor e fixá-lo dentro da estrutura do módulo, conforme descrito pela [Figura 4.27b](#). O conjunto de figuras descrito na [Figura 4.28](#) e [Figura 4.29](#) pode elucidar as principais características do novo módulo.

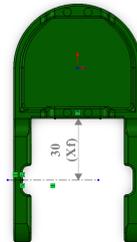
Para descrever essas *features*, começa-se com a altura do paralelepípedo que agora passa a ser calculada desde a base do paralelepípedo até o topo da caixa que contém o motor, conforme [Figura 4.28b](#) e [Figura 4.27b](#). Isso faz com que o eixo do motor, no processo de montagem intermodular, ocupe o mesmo espaço que as abas laterais do módulo. Como 2 corpos rígidos não podem ocupar a mesma posição, ao mesmo tempo, no espaço, uma

Figura 4.29 – Segunda parte das vistas principais do 3º módulo.

(a) Vista posterior.



(b) Vista superior cotada.



Fonte: o Autor.

solução precisa ser encontrada.

Esta solução vem na forma de rasgos laterais com dimensões que permitam o encaixe por deformação plástica das abas durante o processo de encaixe, visíveis em [Figura 4.29b](#) e [Figura 4.29b](#). Para encaixar definitivamente o motor, é necessário torná-lo solidário à estrutura do módulo o qual ele irá movimentar. Isso é resolvido por meio de 2 furos passantes com uma geometria estrelada, contendo o formato de uma peça comum em servomotores, de nome *horn*, braço ou balancim. Essa peça vem inclusa na maioria dos modelos de servomotores e contém, em seu eixo central, dentes compatíveis com aqueles presentes no eixo dos motores.

Assim, ao se posicionar o eixo do motor no centro do furo estrelado e conectar o balancim por fora, cria-se um intertravamento robusto entre os 2 módulos, visível na [Figura 4.28b](#) e [Figura 4.28b](#), o que resolve o problema da conexão. A fixação do eixo do motor com os braços gera um erro geométrico intrínseco. Como há um número discreto de canais de conexão, não necessariamente o braço e o furo passante do eixo irão se alinhar para todos os módulos. O presente trabalho não modela com exatidão o erro geométrico introduzido

por esse tipo de conexão, mas é importante salientar que ele existe.

Outra *feature* importante do novo módulo é o arredondamento do paralelepípedo na seção mais distante das abas laterais, visto em [Figura 4.27a](#) e [Figura 4.28b](#). Como ela irá ser conectada entre 2 abas laterais de um módulo adjacente, haverá rotação e essa rotação pode fazer com que as quinas/extremidades/arestas/vértices do paralelepípedo acabem acidentalmente colidindo com o módulo adjacente. Para evitar esse problema, usou-se um paralelepípedo de base circular visando suavizar a possível superfície de contato entre os 2 módulos.

Para garantir que não existe colisão intermodular, é necessário dimensionar a variável  $xT$ , que mede a distância entre o fim do paralelepípedo que encapsula o motor e o centro do furo estrelado, conforme [Figura 4.28b](#). Fazer essa distância o maior possível traz como vantagem a inexistência de possibilidade de colisão intermodular, porém às custas de aumentar o torque sobre as juntas do motor, até em casos que impossibilitem o movimento por esforços mecânicos excessivos. Dessa maneira, o dimensionamento de  $xT$  precisa ser feito visando uma solução de compromisso entre esses 2 casos extremos. Para o caso considerado, através de análise geométrica, foi constatado que o ângulo máximo das juntas é de aproximadamente  $82^\circ$ .

Outra *feature* crucial para a possível passagem de fios entre os módulos é o furo passante longitudinal presente na caixa do motor, conforme mostrado na [Figura 4.28b](#) e [Figura 4.29b](#). Após a fixação do motor, ele dá origem a 2 regiões laterais nas quais fios podem ser conectados e uma região, marcada em vermelho na [Figura 4.36a](#). Foi-se comprovado em testes empíricos que a passagem de fios pela região vermelha acaba resultando em graves limitações mecânicas para o movimento do robô, com o travamento brusco das juntas do mecanismo e o possível rompimento dos cabos conectados nessa região. A mesma observação não foi feita durante a passagem de fios pelas cavidades laterais, nas quais a influência dos fios foi muito mais suave. As dimensões desse furo passante também são configuráveis e precisam atender à solução de compromisso entre disponibilidade de passagem de fios e rigidez estrutural do módulo.

O modo de fixação escolhido para a caixa do motor e o motor em si é o uso de parafusos. Estes conectam os furos pré fabricados do motor ao arco plano que une as duas paredes da caixa do motor. Para melhoria da interface de contato na fixação, usou-se uma fixação por conjunto de arruela, porca, arruela para cada parafuso. A altura do arco plano é também configurável a depender do tamanho do parafuso a ser instalado. Outras pequenas *features* incluem: o abaulamento das extremidades das abas laterais, conforme [Figura 4.27a](#), pelo mesmo motivo que o da caixa do motor, ocorre de modo a evitar colisão entre as abas laterais de módulos adjacentes interconectados durante uma rotação de maior amplitude. O abaulamento geral de todas as linhas formadas por superfícies perpendiculares ocorre visando a redução dos riscos de acidentes por cortes durante o manuseio das peças, porém

esse tipo de operação só é monetariamente factível em ambientes de manufatura aditiva em virtude de altos tempos de execução e gastos para gerar peças assim. Soluções similares podem ser obtidas por processos como o lixamento ou o tamboramento.

Caso se opte por um esquema de montagem que não use fios, o sistema mecânico precisa ter uma caixa de motor que seja capaz de abrigar todas as peças necessárias, como baterias, módulos de comunicação sem fio, controladores e o próprio motor. A escolha por esse projeto eletrônico reduziria ainda mais a chance de colisão intermodular, porém as dimensões e massa do módulo poderiam ser aumentadas para compatibilizar a presença de tantas peças, o que poderia sobrecarregar os motores por esforço mecânico excessivo. Para ambos os casos, a construção sem tampa superior favorece a manutenção.

Para o caso de montagem através de fios, esse módulo apresenta o melhor conjunto de características dentro dos 3 módulos aqui apresentados. Os furos passantes através da caixa do motor, em conluio com as relações dimensionais apresentadas para melhor encaixe entre módulos apresentados na [Figura 4.28a](#), na [Figura 4.28b](#) e na [Figura 4.29b](#) fazem com que a fiação fique protegida por toda a extensão do comprimento do mecanismo modular, exceto para ângulos grandes, próximos da região limite de aproximadamente  $82^\circ$ , na região de interface entre 2 módulos adjacentes. Quanto maior  $xT$ , menor o risco de colisão da fiação com outros módulos adjacentes, porém maior o risco de colisão da fiação com elementos externos não modelados e dependentes do ambiente. O fato da caixa do motor ser aberta ainda pode gerar riscos de dano a estrutura interna do módulo, mas o conjunto enquanto montado, acaba reduzindo a exposição de suas peças a condições externas.

Considerando a geometria proposta do módulo, é válido questionar se essa escolha possibilita a execução dos principais tipos de locomoção de cobras. Inicialmente a [Figura 4.30a](#) demonstra como ficaria o sistema modular montado a partir do 3º módulo proposto. Pela teoria, ao se fixar o mesmo ângulo de juntas para cada um dos módulos, cria-se uma curva circular, a qual pôde ser feita pelo conjunto modular conforme [Figura 4.30b](#). Ao serem atuadas somente as juntas de orientação *pitch*, chega-se em uma curva vertical de formato semelhante ao da [Figura 4.31a](#).

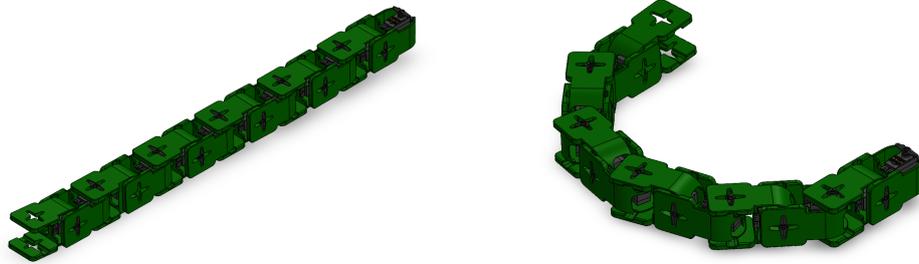
Analogamente, ao atuar somente as juntas de orientação *yaw*, chega-se em uma curva horizontal de formato semelhante ao da [Figura 4.31b](#). A atuação conjunta de todas as juntas presentes no sistema encadeado pode dar origem a diferentes configurações geométricas que geram diferentes movimentos ao longo do plano considerado, como no caso da [Figura 4.31c](#). Considerando também os movimentos propostos em (GOMES et al., 2023), a [Figura 4.32a](#) demonstra a possibilidade geométrica de locomoção sobre escadas via a primeira estratégia demonstrada no referido artigo: movimento *pitch-pitch* e a [Figura 4.32b](#) demonstra a capacidade geométrica do módulo de performar a subida de escadas via movimento *pitch-yaw*.

Conforme descrito no [Capítulo 2](#), a inserção de superfícies de atrito pode alterar dras-

Figura 4.30 – Montagem final do 3º robô modular e onda circular.

(a) Vista isométrica do 3º robô montado.

(b) Robô em onda circular.

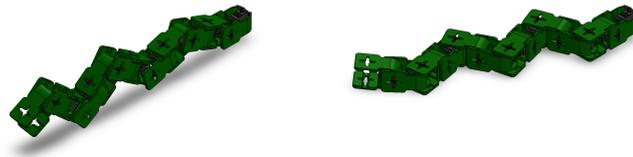


Fonte: o Autor.

Figura 4.31 – Curvas Horizontal e Vertical para o 3º robô.

(a) Robô em curva vertical  
*pitch-pitch.*

(b) Robô em curva horizontal  
*yaw-yaw.*



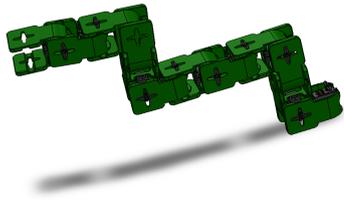
(c) Robô em curva mista  
*pitch-yaw.*



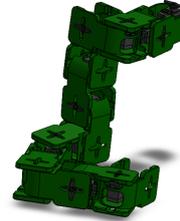
Fonte: o Autor.

Figura 4.32 – Possibilidade de subir escadas do robô proposto.

(a) Robô configurado para subir escadas via movimento *pitch-pitch*.



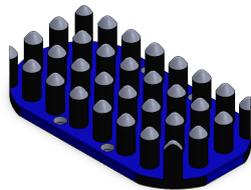
(b) Robô configurado para subir escadas via movimento *pitch-yaw*.



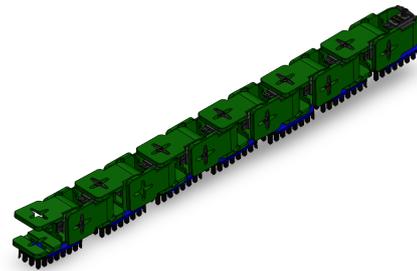
Fonte: o Autor.

Figura 4.33 – Possibilidades de alteração de atrito superficial no robô.

(a) Placa de atrito adaptada de (TA et al., 2022).



(b) Robô com placas de atrito ventrais.



Fonte: o Autor.

ticamente o comportamento cinemático do mecanismo. Em virtude da geometria superficial plana do terceiro módulo, é factível que, sobre ele, em qualquer uma das direções de seu invólucro, sejam posicionadas superfícies de atrito como as apresentadas em (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018) e que foram adaptadas para o caso descrito aqui em Figura 4.33a, de modo que, quando posicionadas na base do robô, como mostrado na Figura 4.33b, consigam alterar de maneira perceptível suas medidas cinemáticas.

Em virtude do conjunto de características apresentados, o terceiro módulo foi escolhido para fabricação. Por ser uma peça complexa, métodos clássicos de manufatura subtrativa gerariam custo alto de fabricação. Por conta disso e com a disponibilidade de serviços do grupo *Ereko* e do Laboratório Aberto de Brasília situados ambos na Universidade de Brasília, optou-se pela manufatura aditiva como método de produção. Mais especificamente, foi escolhido o método *Fused Deposition Modeling* (FDM) que funciona através da deposição de filamento plástico fundido sobre uma superfície, em camadas com altura definida, até

gerar um objeto tridimensional. As configurações de impressão para o módulo são:

- Impressora: Prusa MK3S;
- Filamento: PLA verde de densidade  $1,26\text{g/cm}^3$
- Altura de camada: 0,2 mm;
- Perímetros: 2;
- Camadas Sólidas de topo: 5;
- Camadas Sólidas de base: 4;
- Preenchimento Retilíneo 20%
- Velocidade de impressão média: 60 mm/s;

Uma peça final, sem a instrumentação, possui massa de 63,41 g com as configurações utilizadas ao longo da impressão. O tempo total de impressão foi de 5 horas e 47 minutos para cada uma das peças. Incluído o motor, a massa vai para 118,41 g. A massa total do robô, incluído a fiação escolhida foi de 1691 g, o que gera em torno de 141g por módulo montado, com fiação e peças adicionais.

É importante notar que, pelo esquema de distribuição de fios escolhidos, há uma pequena heterogeneidade de distribuição de massa ao longo do corpo do conjunto modular interconectado. Quanto mais próximo da cabeça, maiores são as quantidades de fios de sinal PWM amarelos AWG 22. Essa diferença de massa não afetou significativamente a dinâmica observada do sistema mecatrônico em questão.

Em termos de dimensões, cada módulo pode ser contido em um paralelepípedo de  $62 \times 62 \times 116$  mm. Em virtude da sobreposição entre os módulos no processo de montagem, o comprimento total do módulo é de aproximadamente 853 mm. A seção transversal quadrada dos módulos e as relações descritas para o encaixe entre eles faz com que não haja alteração na largura do mecanismo completo montado.

Em termos de custo, soluções privadas foram consultadas e valores de 25 a 50 reais por módulo foram encontrados. Para a fabricação de 12 peças, isso significaria custos de 300 a 600 reais somente para as caixas dos motores. Com o apoio do Laboratório Aberto, o custo final ficou em torno de 60 reais, pois somente o material do filamento foi cobrado.

#### 4.1.3.1 Validação do cálculo de torques sobre o motor escolhido

Conforme descrito no [Capítulo 3](#), a validação de torques sobre o motor é necessária para o correto dimensionamento do módulo e para a movimentação adequada e suficiente das juntas do sistema mecatrônico. Para realizá-la, considere o esquema de montagem

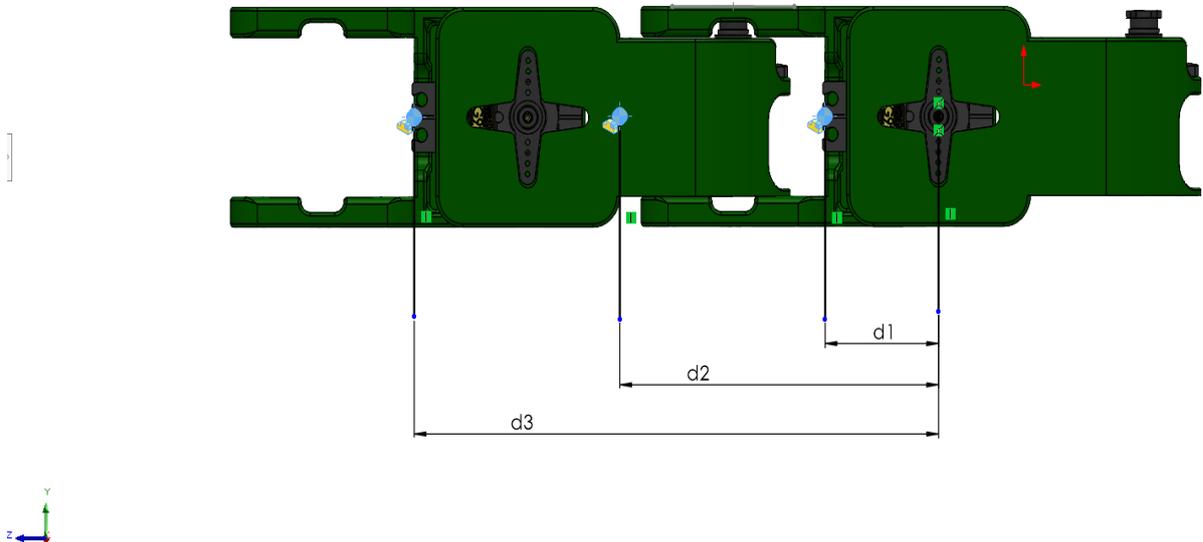
exibido pela [Figura 4.34](#). Nela, o motor à direita deve ser capaz de erguer, via conexão com o seu módulo adjacente também à direita, tanto a sua própria estrutura, quanto também a estrutura de seus 2 módulos adjacentes à esquerda. Conforme exibido em ([HIBBELER, 2017](#), p. 166), ao considerar o centro de massa de cada um dos módulos como o ponto sobre o qual atuará toda a força peso resultante sobre cada um dos módulos, conseguiu-se obter três distâncias de interesse:  $d_1$  que é a distância horizontal medida entre o eixo do motor analisado e o centro de massa do módulo que contém o próprio motor;  $d_2$  que é a distância horizontal medida entre o eixo do motor analisado e o centro de massa do primeiro módulo adjacente, pela esquerda, ao módulo que contém o motor analisado e  $d_3$  que é a distância horizontal medida entre o eixo do motor analisado e o centro de massa do segundo módulo adjacente, pela esquerda, ao módulo que contém o motor analisado. A aceleração gravitacional foi considerada constante e seu valor considerado foi o mesmo que o apresentado em ([BRAQUEHAIS; MORAIS, 2015](#)), que é o valor mais adequado encontrado até então para a região geográfica da Universidade de Brasília.

O valor de torque máximo na condição de *stall* foi obtido através de *datasheet*, em ([ETC, 2000](#)) e posteriormente convertido para as unidades em Sistema Internacional de Medidas (S.I.). Todos os valores de distância foram calculados numericamente via *SolidWorks*<sup>TM</sup>. Para garantir a acurácia dos resultados, nas configurações de peça dentro do software, conseguiu-se alterar as propriedades físicas de cada um dos materiais para que elas chegassem o mais perto possível do valor real dessas medidas. Um problema nessa estratégia é que ela considera os materiais como homogêneos. No caso do módulo construído via manufatura aditiva, seu interior não é maciço em virtude da escolha de percentual de preenchimento, mas a hipótese de material homogêneo é uma aproximação que facilita os cálculos sem prejudicar a validade das informações obtidas, como mostrado abaixo.

Diante dos dados coletados para as variáveis de interesse presentes na [Tabela 4.3](#) e usando a [Equação 3.1](#) e a [Equação 3.2](#), chega-se em um valor máximo de massa para o funcionamento do módulo de  $m_{max} = 273$  g. Dessa forma, o módulo atual que possui massa média estimada de 141g tem uma folga relativa ao seu próprio peso de 132g, ou seja, de aproximadamente 94%, o que caracteriza o projeto com uma boa margem de segurança para garantia de locomoção do módulo. Os resultados da validação estão gravados em vídeo conforme descrito no Vídeo "7º: Teste de torque" ([ROCHA, 2023q](#)), com a movimentação dos 2 módulos adjacentes e no vídeo "8º: Variação de ângulo no robô montado". Esse vídeo conta com a variação da velocidade de atuação desses mesmos módulos em diferentes posições angulares.

Ao longo dos resultados do projeto mecânico, foram expostos três possibilidades de módulos para a construção do protótipo. Para cada um deles, foram destacadas as características geométricas que favoreceriam ou prejudicariam os tipos de montagem elétrica discutidas na Metodologia. Para o propósito descrito, a terceira opção de módulo apresen-

Figura 4.34 – Vista lateral do robô para validação de torques.



Fonte: o Autor.

Tabela 4.3 – Variáveis de interesse para o cálculo de torque nos motores.

Variável	Valor
$d_1$	37 mm
$d_2$	104 mm
$d_3$	171 mm
$g$	$9,7808439 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
$\tau_{max}$	$0,83356525 \text{ N}\cdot\text{m}$

Fonte: baseado em (BRAQUEHAIS; MORAIS, 2015), (ETC, 2000)

tou um conjunto de características que foi preferido, em virtude de seu tamanho reduzido, simplicidade de fabricação e de passagem de fios pelo interior do conjunto. Posteriormente, serão apresentados os resultados referentes ao esquema de conexões elétricas escolhido, assim como suas vantagens e problemas inerentes.

1

<sup>1</sup> Todos os desenhos feitos para o Projeto Mecânico do Robô podem ser obtidos em <[https://github.com/deDeusThiago/Ereko\\_Snake\\_Robot](https://github.com/deDeusThiago/Ereko_Snake_Robot)>.

Tabela 4.4 – Preços estimados dos componentes elétricos e eletrônicos para o projeto.

Item	Preço ( R\$)	Quantidade	Total(R\$)
Arduino Uno R3	57	1	57
Arduino Nano	39	12	468
Arduino Pro Mini	30	12	360
PCA 9685	66	1	66
Fonte chaveada	40	1	40
Extensão elétrica	30	1	30

Fonte: <<https://www.makerhero.com/>>.

## 4.2 Projeto Eletrônico

### 4.2.1 Dimensionamento e montagem

Conforme descrito no projeto mecânico em [subseção 4.1.3](#), o esquema de comando com controladores dedicados mostrado na alternativa 3 não cumpre os critérios temporais de disponibilidade e de baixo custo, portanto ele será desconsiderado durante a continuação desse projeto. Para mais detalhes, há uma tabela ilustrativa que exemplifica preços médios dos componentes utilizados no projeto de acordo com o orçamento da [loja disponível no link](#), assim como nos próprios valores dos componentes comprados para a execução do projeto.

Em virtude dos requisitos de massa reduzida e bom intervalo angular de movimentação, assim como na falta de baterias de alta capacidade e microcontroladores suficientes, o projeto elétrico e eletrônico será baseado na estratégia 2, conforme [Figura 3.18](#). Como os requisitos de viabilidade e de tempo de operação levaram à escolha da passagem de fios entre módulos, cabe decidir entre a implementação 1 e a a implementação 2. Para nortear a escolha, é importante considerar aspectos como:

- Os motores utilizados já foram aplicados em projetos anteriores, de modo que, mesmo testados individualmente, há o risco de que um ou mais quebre ou deixe de apresentar o desempenho previsto pelo fabricante para uma peça nova.
- Grandes quantidades de fios nas juntas do robô modular podem reduzir sua faixa de operação angular, assim como podem aumentar os esforços mecânicos sobre a junta em virtude de efeitos não modelados dos fios sobre a dinâmica do mecanismo.
- Uma grande quantidade de fios adiciona massa ao conjunto modular, fazendo com que os motores sejam submetidos a esforços mecânicos maiores.

Em virtude desses fatos, optou-se pela segunda implementação, com 2 fios centrais a partir dos quais serão derivadas as saídas do sistema elétrico em suas respectivas posições. Para execução do esquema de montagem da segunda alternativa, os materiais realmente utilizados foram:

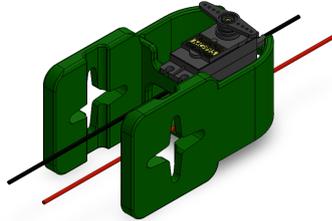
- Extensão elétrica megatron de 3m;
- Fonte chaveada de 5 V e 20 A max. ;
- 1 fio preto de 5m e bitola 1,5 mm<sup>2</sup>
- 1 fio vermelho de mesmo comprimento e diâmetro;
- 12 fios amarelos 22 AWG de 1.5m cada.
- 12 fios vermelhos e 12 pretos AWG 22 de comprimento aproximado de 20cm cada;
- 1 conector Syndal de 12 entradas e saídas;
- 12 conectores MODU do tipo fêmea;
- Tubos termo retráteis de cor preta, amarelo e vermelha;
- Alicates crimpador e crimpados variados;
- 5 conectores do tipo olhal para 20A;
- Alicates de corte diversos;
- Estilete;
- Kit multiuso de chaves;
- Fita isolante preta e fita adesiva transparente;
- Microcontrolador Arduino Uno R3;
- Placa PCA 9685;
- Jumpers diversos.

Para isso, o primeiro passo é dimensionar os condutores elétricos principais. Considerando as condições máximas de operação para os servomotores MG 995 de 1,2 A de corrente de *stall*, conforme (ETC, 2000), as linhas de alimentação dos motores precisariam suportar ao menos 14.4 A. Conforme (ABNT, 2012), a bitola mínima para 15A é de 1,5 mm<sup>2</sup> de diâmetro. Para correntes individuais de 1,2 A, os fios do próprio servomotor 22 AWG são suficientes conforme ASTM B258-14.

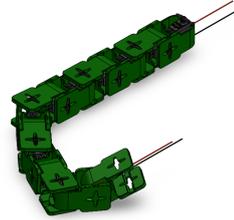
Para um esquema de  $3n$  fios AWG 22, a massa total dos fios seria próxima de 156g. Para um esquema de  $n$  fios AWG 22 de 1,5 m de comprimento e 2 fios de área de seção transversal de 1,5 mm<sup>2</sup>, com 2m de comprimento cada, a massa total seria majorada pelo valor de 111g. Os valores obtidos para essa estimativa de massa dos fios vem de (AUDIONICA, 2012). Em

Figura 4.35 – Montagem teórica do esquema elétrico.

(a) Esquema de passagem dos fios pelo módulo.



(b) Robô após a passagem dos fios de alimentação.



Fonte: o Autor.

virtude dos valores obtidos, o segundo esquema de fios representa, indubitavelmente, um circuito elétrico que minimiza a massa do mecanismo modular final.

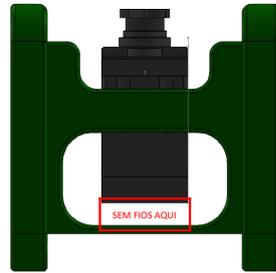
A partir do modelo mecânico escolhido, ou seja, do módulo 3, a implementação do esquema eletrônico 2 pode ser feita da seguinte forma. Inicialmente, é importante testar o funcionamento dos motores individualmente e garantir a qualidade das conexões elétricas entre as diferentes partes do circuito por meio de testes de continuidade elétrica. O teste de continuidade é feito diretamente por meio do multímetro. Uma vez garantido que todos os motores apresentam funcionamento satisfatório, prossegue-se para a fixação deles em seus respectivos invólucros, formando assim um módulo, conforme visto também na parte de projeto mecânico, na [Figura 4.27b](#). Depois que cada módulo é preparado, começa a parte mais duradoura temporalmente da montagem: a conexão dos módulos e a passagem dos fios de bitola grossa por dentro dos módulos, conforme a [Figura 4.35a](#). É importante salientar que, nessa parte, busca-se isolar eletricamente o fio **Vcc** vermelho do fio **Gnd** preto através do seu posicionamento em lados opostos do módulo, via cavidades diferentes dentro do módulo, as quais podem ser vistas na [Figura 4.36a](#) e na [Figura 4.36b](#).

Uma vez que essa passagem inicial tenha sido realizada, conforme exposto na [Figura 4.35b](#), começa o processo de conexão dos fios finos aos grossos finalizando a derivação de alimentação. Para cada um dos módulos, partindo da cabeça e indo até a cauda. Além da derivação para o fio central, também é importante destacar que os fios de sinal PWM são estendidos, todos no mesmo sentido, por cabos de cor amarela, por convenção, de 1.5m até chegarem na placa PCA 9685.

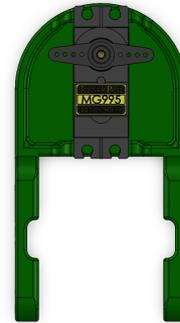
A distância entre as derivações para cada um dos fios principais poderia ser dada de maneira fixa, caso fosse considerado um esquema de montagem que preservarem exatamente os mesmos comprimentos de todos os elementos entre os módulos. No entanto, como os fios

Figura 4.36 – Montagem teórica do esquema elétrico.

(a) Cavidades laterais com permissão e limitação para passagem dos fios elétricos.



(b) Vista superior das cavidades.



Fonte: o Autor.

se organizam de maneira progressivamente mais desordenada, independente da técnica de organização escolhida, conforme seu número aumenta, há diferentes graus de deformação dos fios dentro de cada módulo, de forma que cada emenda deve ser feita individualmente.

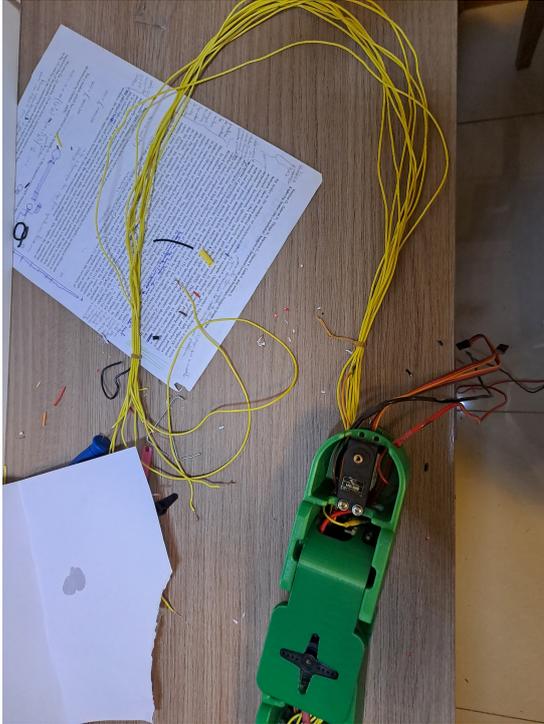
Como regra geral, a posição exata da emenda foi feita 2 módulos adiante do motor a partir do qual saiu a derivação e o ponto exato de conexão foi tomado como aquele no meio da caixa do motor. O meio foi escolhido de forma a prover folgas para a movimentação do mecanismo conforme ele dobra suas juntas, de modo que um ponto fraco, como uma emenda, ao menos na maioria das vezes, ficasse protegido de possíveis intempéries ou imprevistos ambientais na região da junta onde há a maior exposição de fios. Os resultados da montagem podem ser vistos na [Figura 4.37a](#) e na [Figura 4.37b](#)

Uma vez finalizada as conexões dentro dos atuadores do sistema robótico faz-se necessário conectá-lo aos elementos externos de alimentação e controle. Para a conexão com o circuito de alimentação, usou-se uma fonte chaveada de 5V e 20 A máximos. Essa fonte possui uma entrada em corrente alternada (AC), com 3 pinos principais: Terra, Fase e Neutro. A tensão da rede é de 220 V<sub>rms</sub>. A saída da fonte é do tipo corrente contínua com 2 pinos principais: V+ e V-. Vale ressaltar que o padrão de cores utilizado no projeto está em concordância com a norma ABNT NBR 5410 que dita sobre a coloração dos fios condutores no Brasil. Azul para o fio neutro; vermelho, preto ou marrom para o fio fase e verde ou verde e amarelo para o fio terra. As conexões do robô à fonte e da fonte à tomada ocorreram da seguinte forma. Os fios que vem direto da tomada foram ligado a conectores do tipo olhal, conforme [Figura 4.38b](#) e fixados, via parafuso, nos locais adequados da fonte. Analogamente, os dois fios de saída DC da fonte também recebem o mesmo tipo de conector olhal, vide [Figura 4.38c](#), e são fixados da mesma maneira nos seus respectivos lugares na fonte.

Para realizar as conexões dos atuadores para o respectivo sistema de controle e comando, foram crimpados aos fios amarelos de sinal PWM estendidos os conectores MODU

Figura 4.37 – Montagem do esquema elétrico.

(a) Passagem de fios elétricos entre 2 módulos reais.



(b) Robô finalizado com conexões elétricas de alimentação.



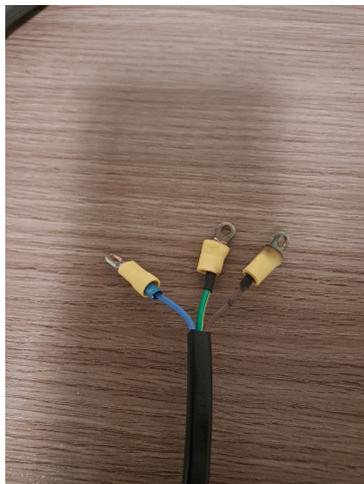
Fonte: o Autor.

Figura 4.38 – Montagem do esquema elétrico para a fonte.

(a) Fonte Chaveada de 5V e 20A máximos comum.



(b) Conectores tipo olhal nas entradas AC da fonte.



(c) Conectores tipo olhal nas saídas DC da fonte.



Fonte: o Autor.

do tipo fêmea. Com esses conectores, a fixação nas saídas PWM da placa PCA 9685 fica mais favorável, porém ainda com folga mecânica, o que prejudica o contato elétrico nessa parte do circuito. Todos os pinos **Gnd** do circuito foram conectados ao mesmo referencial, localizado em qualquer lugar do fio preto de maior área de seção transversal, o qual é conectado ao pino V- na saída da fonte. Esse referencial, no entanto, é flutuante, pois verificou-se que enquanto o fio terra está conectado à carcaça metálica do circuito, ele está isolado eletricamente do pino V-. Todos os pinos que requerem alimentação de 5V foram conectados diretamente ao outro fio vermelho de área de seção transversal maior. As conexões do circuito de controle podem ser vistas na listagem abaixo, assim como também na [Figura 4.39](#).

- Analog IN 4 do Arduino se liga a **SCL** da placa;
- Analog IN 5 do Arduino se liga a **SDA** da placa;
- Pino de 5 V do Arduino se liga ao **Vcc** da placa;
- **Gnd** do Arduino se liga ao **Gnd** da placa;
- **Gnd** do Arduino se liga ao OE da placa;

Para a estratégia de montagem escolhida, enquanto em [Capítulo 3](#) foi dada atenção especial para os aspectos dimensionais e de massa da montagem, o que a [Figura 4.39](#) traz de novo é uma descrição abstrata e genérica das conexões elétricas exatas para o funcionamento do projeto, garantindo, dessa forma, um bom grau de robustez quanto a escolha dos fabricantes e o posicionamento físico de cada um dos pinos para os componentes escolhidos durante a montagem do protótipo.

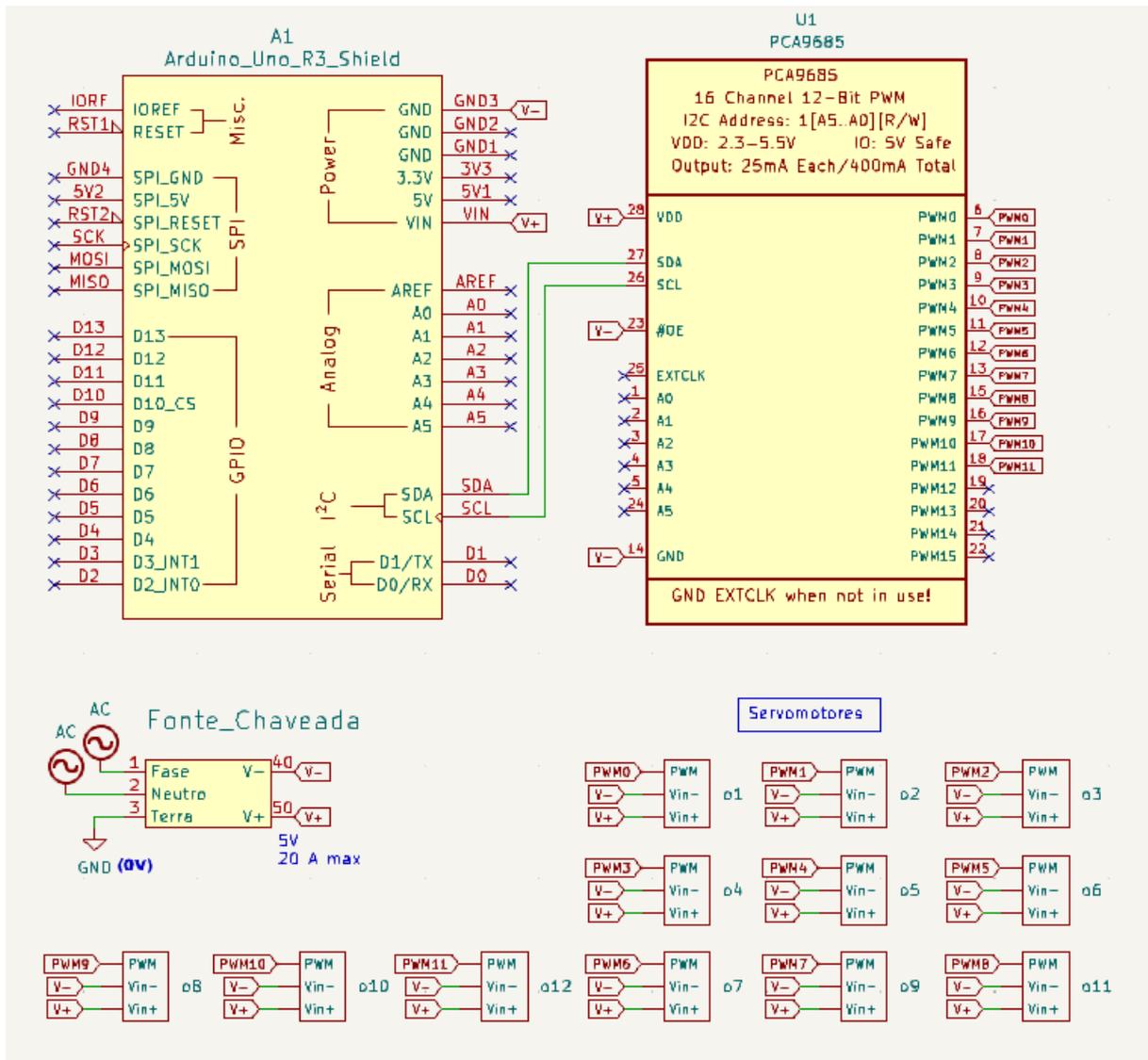
Conforme descrito ao longo dos resultados para o Projeto Eletrônico, o esquema de montagem adotado segue os passos clássicos de dimensionamento de redes elétricas. Inicialmente, calcula-se a corrente máxima para os instrumentos já posicionados no conjunto. Com esse valor, escolhe-se o paradigma de conexões que privilegia a economia de massa, para evitar sobrecargas mecânicas em detrimento da facilidade de troca e manutenção das peças. Os fios elétricos são instalados conforme esse paradigma e as zonas de conflito de montagem são identificadas. Também é montado o circuito de Controle Computacional. Posteriormente, será analisada a implementação dos algoritmos de locomoção escolhidos e o seu efeito sobre as possíveis trajetórias do sistema mecatrônico analisado.

## 4.3 Controle e Testes de Movimentação

### 4.3.1 Descrição da Estratégia de Comando

Para entender como a largura de pulso é processada e o que sua variação gera de resultado na saída do motor, foi necessário deduzir a resolução associada ao pulso PWM

Figura 4.39 – Diagrama do circuito utilizado no projeto.



Fonte: o Autor.

enviado para os motores, uma vez que ela é necessária para o controle dos motores devido às especificações internas de funcionamento da biblioteca Adafruit PWM. Como, conforme (NXP, ), a placa PCA 9685 armazena o valor da largura de pulso em uma variável de 12 bits, então há um espectro de 4096 valores possíveis no processo de codificação. Os servomotores escolhidos, MG 995, possuem frequência de operação de 50 Hz, ou seja,  $T = 20$  ms de período. Dessa maneira, a mínima variação de largura de pulso detectável pelo sistema é de  $20/4096 = 4.88 \mu\text{s}$  por valor detectável. O fabricante do motor define o seguinte mapeamento teórico inicial dado pela Tabela 4.5. A partir desse mapeamento se encontrou as larguras de pulso correspondentes às posições angulares.

- Para  $0^\circ$  teórico, a largura SERVOMIN deveria ser 102, ou seja,  $\approx \frac{500 \mu\text{s}}{4.88 \mu\text{s}}$ ;

Tabela 4.5 – Mapeamento teórico do servomotor MG 995 entre largura de pulso PWM e ângulo final.

Período do pulso [ $\mu\text{s}$ ]	Ângulo final ( $^\circ$ )
500	0
1500	90
2500	180

Fonte: (ETC, 2000).

- Para  $180^\circ$  teórico, a largura SERVOMAX deveria ser 512, ou seja,  $\approx \frac{2500\mu\text{s}}{4.88\mu\text{s}}$ ;

Esses valores são usados dentro do código para definir o primeiro mapeamento. Inicialmente, considera-se um mapeamento via função afim, do intervalo teórico de  $[0^\circ, 180^\circ]$  para o intervalo das larguras de pulso [SERVOMIN, SERVOMAX].

Seguindo essa hipótese, iniciou-se a movimentação de cada um dos motores individualmente, dentro do aparato de calibração mostrado pela [Figura 3.19a](#). Essa movimentação controlada por computador também foi forçada externamente para testar a existência de uma zona morta eletronicamente, mas disponível mecanicamente pela falta de um limitador físico, muito comum nos modelos de servomotores. Essa movimentação foi feita cerca de 30 vezes para cada um dos motores, com um tempo entre atuações do motor de aproximadamente 5s de modo a atestar a repetibilidade dos motores.

Considera-se aqui como repetibilidade a capacidade de um mecanismo de, sob uma mesma entrada, realizar saídas muito próximas quantitativamente umas das outras. O intervalo de incerteza para as considerações de repetibilidade foi escolhido como  $3^\circ$ , tanto para cima quanto para baixo do valor de referência. Se a diferença angular for imperceptível para o aparato de calibração, considerado o limite estabelecido, então o sistema mecatrônico será considerado como repetível. A repetibilidade é uma característica importante da modelagem do motor, pois ela garante que o sistema é, pelo menos no período de tempo considerado, invariante à própria passagem do tempo em termos de seus valores de parâmetros. Os resultados dos testes conduzidos para cada motor podem ser vistos na [Tabela 4.6](#). Dessa forma, os valores adotados foram 113 para SERVOMAX e 485 para SERVOMIN. Com esses valores, garante-se que nenhum dos servomotores apresentava sobrecorrente em estado estacionário e nem ruído de funcionamento excessivo. Dessa forma, a escolha de parâmetros foi fortuita em termos de conservação de energia.

Para a construção do mapeamento entre graus de saída e a largura de pulsos na entrada, optou-se inicialmente por um modelo linear que levasse o intervalo de largura de pulsos [113, 485] para o intervalo angular  $[0^\circ, 212^\circ]$ . Como, por limitações mecânicas o conjunto mecânico não irá alcançar ângulos de junta maiores que  $90^\circ$  para ambos os lados, a região realmente útil é de  $[0^\circ, 180^\circ]$  aproximadamente, portanto a escolha do limitante ser  $212^\circ$  não afeta o desempenho do robô.

Tabela 4.6 – Testes de repetibilidade e ângulo máximo para cada um dos motores.

Motor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Repetível ? (S/N)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Ângulo máximo (°)	215	215	212	212	215	190	215	210	190	205	210	205
Para tremer MAX abaixo de	-	-	-	-	-	-	-	485	-	-	-	-
Para tremer MIN acima de	-	103	104	-	-	-	105	-	113	-	-	-

Fonte: o Autor.

Depois de fazer o mapeamento, para que o sistema funcione é necessário iniciar a comunicação com a placa PCA. Para isso, inicialmente cria-se um objeto do tipo *Adafruit\_PWMServoDriver*, onde se define a frequência de operação do servomotor, que, para o MG 995, é de 50 Hz. Todo o comando dos motores é centralizado em torno da função *atua\_motor (#servo, ângulo)* que posiciona cada um dos servomotores especificados na posição angular especificada. Para fins de planejamento de trajetória e coordenação de juntas, é importante definir uma sequência de ângulos a serem seguidos para cada uma das juntas do robô. Conforme definido por [Equação 2.24](#) e [Equação 2.25](#), o [linha 7](#) apresenta um procedimento sistemático de preenchimento das listas de ângulos para cada um dos tipos de movimento executados pelas juntas do mecanismo. A lista para os motores do tipo *pitch* é denominada *passos\_pitch[]* e a lista para os motores do tipo *yaw* é denominada *passos\_yaw[]*.

---

**Algorithm 1** DEFINIÇÃO DA LISTA DE ÂNGULOS
 

---

**Entrada:**  $k_v, k_h, \alpha_h, \alpha_v, \Delta\phi_{vh}, \phi, d_0, d, M, N$ .**Saída:** *passos\_pitch[]*, *passos\_yaw[]*.1 **início**

2    escolha valores para as variáveis de entrada;

**para**  $j$  de 0 até  $N$ , **faça**: **faça**3         $passos\_pitch[j] \leftarrow 2\alpha_v \sin\left(\frac{2\pi k_v}{M}\right) \cdot \sin\left[\phi + \frac{4\pi k_v}{M} \cdot \left(j - 1 + \frac{d_0}{d}\right)\right]$ .4         $passos\_yaw[j] \leftarrow 2\alpha_h \sin\left(\frac{2\pi k_h}{M}\right) \cdot \sin\left[\phi + \frac{4\pi k_h}{M} \cdot \left(j - \frac{1}{2} + \frac{d_0}{d}\right) + \Delta\phi_{vh}\right]$ .5     **fim**6 **fim**7 **retorna** *passos\_pitch[]*, *passos\_yaw[]*


---

Uma vez preenchida a lista de ângulos para o tipo de movimento desejado, foi escolhido que o início de cada movimento seria realizado a partir da posição de descanso das juntas, ou seja, quando seu ângulo de juntas fosse nulo. Apesar de não ser a única forma de se iniciar o movimento do robô, ao garantir que em toda sequência de atuações, o mecanismo sempre inicia a partir do mesmo conjunto de ângulos de junta permite uma maior repetibilidade em termos de resultados das análises cinemáticas e dinâmicas que podem ser realizadas com o robô. Para executar essa sequência de atuações, o procedimento definido em [linha 12](#) foi adotado.

---

**Algorithm 2** INICIALIZAÇÃO DOS MOTORES
 

---

**Entrada:**  $M$ ,  $tempo1$ .

**Saída:** motores atuados fisicamente e robô na posição de descanso

```

8 início
9   escolha valores para as variáveis de entrada;
   para  $j$  de 0 até  $M$ , faça: faça
10   |   espere( $tempo1$ );
   |   atua_motor( $j$ ,  $90^\circ$ ); espere( $tempo1$ );
11   fim
12 fim

```

---

Por último, a função geral de coordenação e movimentação dos motores explica o funcionamento do esquema cinemático proposto. Como o esquema dos osciladores senoidais envolve múltiplas juntas, é factível imaginar a criação de uma matriz de ângulos para cada um dos motores. No entanto, como todas as juntas estão defasadas em relação às suas adjacentes, faz sentido e é melhor em termos de gestão de memória, que a lógica seja baseada em uma lista de ângulos para um módulo de referência.

Dessa maneira, o ângulo feito pela junta posterior à de referência será nulo ou em repouso nos instantes anteriores em que a referência não se mover e, quando esta se move, a sua adjacente assume a mesma posição, atrasada de um valor de fase constante de acordo com a [Equação 2.24](#) e [Equação 2.25](#). Dessa forma, se ao final de um ciclo de execução, a lista de referência for atualizada, todos os outros motores adjacentes seguirão a mesma lógica de funcionamento. Aquilo que inicialmente era uma matriz  $n \times n$ , passou a ser uma matriz diagonal e agora é só uma lista seguida de uma adequada lógica de repasse de dados.

O repasse ou atualização é justamente o que garante a locomoção dos valores propostos pelo controlador usando a diferença de posição da lista de referência como uma representação da diferença de fase. Essa estratégia é representada de maneira resumida em [linha 23](#). Nesse algoritmo, `lista_pinos[]` representa uma lista com os ângulos definidos pelas equações da onda serpenoide para cada um dos grupos de motores e `posicao_atual[]` representa a respectiva lista de referência para cada uma das orientações de motor. Nesse algoritmo, `pinos_pitch[]` e `pinos_yaw[]` são listas resultantes do mapeamento de cada um dos motores físicos com a posição a partir da qual eles seriam atuados via placa PCA 9685.

Em funcionamento perfeito, o primeiro motor seria atuado pelo primeiro pino e assim sucessivamente. No entanto, a possibilidade de falha para um ou mais pinos leva à criação de um mapeamento via lista, assim, centralizando e flexibilizando o posicionamento dos motores relativamente a seus terminais elétricos. `posicao_atual_pitch[]` e `posicao_atual_yaw[]` são duas listas auxiliares no processo de atualização das listas de referência de ângulos `passos_pitch[]` e `passos_yaw[]`. É essa atualização que garante a economia de memória durante a atuação.

**Algorithm 3** COORDENAÇÃO DOS MOTORES

**Entrada:**  $a, b$  pinos\_pitch[], posição\_atual\_pitch[], passos\_pitch[], pinos\_yaw[], posição\_atual\_yaw[], passos\_yaw[],  $M_{\text{meio}}$ , quant\_passos.

**Saída:** motores atuados fisicamente e robô se movimentando no espaço.

```

13 início
14   escolha valores para as variáveis de entrada;
      ative a o algoritmo de Inicialização dos motores();
      ative a Definição da lista de ângulos();
      para  $i$  de 0 até  $quant\_passos$ , faça: faça
15      $a \leftarrow passos\_pitch[i]$ ;
        $b \leftarrow passos\_yaw[i]$ ;
       atua_motor(pinos_pitch[0],  $a$ );
       atua_motor(pinos_yaw[0],  $b$ );
       para  $j$  de 1 até  $M$  faça: faça
16         atua_motor(pinos_pitch[ $j$ ], posição_atual_pitch[ $j$ ]);
           atua_motor(pinos_yaw[ $j$ ], posição_atual_yaw[ $j$ ]);
17       fim
18     para  $j$  de  $M$  até 1 faça: faça
19       posição_atual_pitch[ $j$ ]  $\leftarrow$  posição_atual_pitch[ $j-1$ ];
         posição_atual_yaw[ $j$ ]  $\leftarrow$  posição_atual_yaw[ $j-1$ ];
20     fim
21   posição_atual_pitch[ $j$ ]  $\leftarrow$   $a$ ;
     posição_atual_yaw[ $j$ ]  $\leftarrow$   $b$ ;
22 fim
23 fim

```

#### 4.3.2 Testes da Estratégia sobre os Componentes e o Robô

Após terminar a escrita do código e durante o processo, testou-se o funcionamento da placa PCA 9685 conforme o Vídeo "1º Primeiro teste placa PCA 9685" (ROCHA, 2023k). Os resultados do teste mostraram que a placa era capaz de atuar os servomotores MG 995 por meio de alimentação externa provida por uma fonte. Inicialmente, foi usada uma fonte temporária de 5V e 2A. Uma vez confirmada a capacidade da placa de atuar os motores, prosseguiu-se para um teste com 4 motores, dado pelo Vídeo "2º Coordenação de 4 motores" (ROCHA, 2023d). Como também foi confirmado que era possível atuar 4 motores, iniciou-se a busca pelo menor tempo possível entre duas atuações consecutivas pela placa. Conforme visto no Vídeo "3º: Coordenação mais rápida" (ROCHA, 2023e) a redução desse tempo faz com que os motores fossem atuados mais rapidamente, conforme esperado. Durante os testes, percebeu-se que o tempo mínimo entre 2 atuações consecutivas pela placa fica em torno de 20 ms. Por segurança, escolheu-se 30ms como o tempo mínimo de atuação. A teoria diz que quanto mais rápido o movimento, ou seja, quanto maior for a frequência de oscilação, maiores serão os deslocamentos. Não é objetivo desse trabalho construir uma função exata

entre o *delay* de atuação e os deslocamentos correspondentes do conjunto mecatrônico.

Posteriormente, usando a infraestrutura disponibilizada pelo grupo *Ereko*, foram criados 2 módulos de teste para os primeiros testes de atuação com carga. O Vídeo "4º: Primeiro teste para junta pitch" (ROCHA, 2023j) mostra o primeiro teste de atuação de juntas *pitch*. Conforme visto no vídeo, já é possível notar deslocamento não nulo ao longo do plano considerado. O Vídeo "5º: Segundo teste pitch" (ROCHA, 2023o) mostra a atuação ainda em sentido *pitch* do mesmo módulo anterior, porém agora com o robô orientado 180° relativamente ao caso anterior, com base no seu eixo de rolagem. Nota-se que o motor é capaz de erguer outro módulo sem grandes dificuldades. Para esse caso, o consumo máximo de corrente foi de 0,3 A por motor, o que é somente 25% do valor máximo previsto em (ETC, 2000). Da mesma maneira, o Vídeo "6º: Primeiro teste yaw" (ROCHA, 2023l) demonstra o caso de deslocamento não nulo para o mesmo sistema mecatrônico bi-modular, porém agora atuando sua junta de orientação *yaw*.

O próximo passo para garantir o funcionamento confiável e robusto do robô é garantir que cada uma de suas juntas, ou seja, de seus motores, consiga operar conforme esperado para condições com carga. Para tal, inicia-se conectando eletricamente e mecanicamente todas as peças. A partir disso, faz-se cada um dos motores oscilar entre os valores mínimos e máximos de suas juntas, um de cada vez. Em cada uma dessas oscilações, testa-se o movimento dos motores, assim como o consumo de corrente do circuito e o ruído emitido por eles. Abaixo há uma listagem com os testes individuais e resultados obtidos:

- O Vídeo "9º: Explicação Projeto Elétrico e Teste do motor 1" (ROCHA, 2023g) apresenta o esquema de montagem elétrico e eletrônico, além de mostrar o sucesso do teste para o motor 1;
- O motor 2 foi testado e seu funcionamento foi garantido sem nenhuma ressalva;
- O Vídeo "10º: Teste motor 3" (ROCHA, 2023s) apresenta o funcionamento adequado do motor 3, sem ressalvas;
- O Vídeo "11º: Teste motor 4" (ROCHA, 2023t) apresenta o funcionamento adequado do motor 4, sem ressalvas;
- O Vídeo "12º Teste motor 5" (ROCHA, 2023u) apresenta o funcionamento adequado do motor 5, sem ressalvas;
- Os Vídeos "13º Erro de teste no motor 6" (ROCHA, 2023f) e "13º Continua teste motor 6" (ROCHA, 2023c) apresentam erro no motor 6. O motor não apresenta saída perceptível via rotação do motor, seu sinal de controle de tensão é elevado, mas sua corrente é baixa, por não haver carga sobre o eixo que não é atuado;

- O Vídeo "14° Teste do motor 7" (ROCHA, 2023r) apresenta o funcionamento adequado do motor 7, expondo o consumo alto de corrente quando solicitado por grandes cargas mecânicas;
- O Vídeo "15°- Teste motor 8" (ROCHA, 2023v) apresenta o funcionamento adequado do motor 8, sem ressalvas;
- O Vídeo "16° Teste motor 9" (ROCHA, 2023w) apresenta o não funcionamento do motor 9, assim como especulações sobre os motivos para essa falha;
- O Vídeo "17° Teste motor 9 funcionando" (ROCHA, 2023x) apresenta o funcionamento adequado do motor 9, com as correções encontradas no conector MODU/Dupont entre o fio de sinal PWM e a placa de comando;
- O Vídeo "18° movimentação 4 módulos em diferentes velocidades" (ROCHA, 2023h) apresenta o funcionamento adequado do motor 9, após detecção de folga no conector MODU respectivo ao seu fio de sinal PWM;
- Os motores 10, 11 e 12 também foram testados da mesma maneira e seu funcionamento foi atestado sem ressalvas.

Mesmo com defeitos nos motores 6 e 9, prosseguiu-se com os testes. Como mostra o Vídeo "7°: Teste de torque" (ROCHA, 2023q), os testes de torque realizados estão corretos, sendo o motor capaz de elevar 2 outros módulos adjacentes, mantendo um consumo baixo de 0,3 A de corrente. O Vídeo "8°: Variação de ângulo no robô montado" ainda demonstra que, mesmo sob o efeito de cargas mecânicas maiores, o mecanismo ainda consegue variar sua frequência de operação e consequentemente, sua velocidade de movimento relativo, enquanto mantém baixo o consumo de corrente. Para verificar o funcionamento do conjunto de módulos, inicialmente, como registrado pelo Vídeo "18° movimentação 4 módulos em diferentes velocidades" (ROCHA, 2023h), testou-se o funcionamento de 4 motores, com oscilações dentro do intervalo  $[0^\circ, 180^\circ]$  para cada uma das juntas. Esse teste garantiu que a comunicação entre os 4 motores que funcionavam estava íntegra, mesmo na presença de 2 motores com falhas. Por conseguinte, o Vídeo "19° 1° teste de movimentação com todos os módulos de 0 a 180° e até 0." (ROCHA, 2023b) mostra a atuação conjunta de todos os motores presentes no robô, pela mesma estratégia de controle utilizada no vídeo anterior. Seus resultados expõe que, ao menos os módulos com motores funcionais são capazes de realizar locomoção conforme esperado. Entretanto, no Vídeo "20° Movimento yaw-yaw mal coordenado" (ROCHA, 2023i), ao se restringir a estratégia de movimentação do robô para as juntas *yaw*, a locomoção do conjunto não acontece da maneira desejada. Como o circuito implementado é exatamente o mesmo dos vídeos anteriores, especula-se que a atuação prolongada sobre uma junta composta de um motor danificado acaba deteriorando a comunicação entre os módulos. Não foram feitos testes para comprovação dessa hipótese,

mas, como demonstrado posteriormente, após a troca dos motores, esse tipo de problema deixou de acontecer.

Após os testes, conforme foram detectados os erros nos motores 6 e 9, eles precisaram ser substituídos por modelos semelhantes. Essa substituição precisou ser realizada através da compra de 2 motores de mesmo modelo, uma vez que todas as peças disponíveis no grupo *Ereko* já haviam sido utilizadas para a confecção do protótipo atual. Durante a troca dos motores, a estratégia de passagem de fios centrais de área de seção maior descrita no Projeto Eletrônico impôs severos desafios: a geometria reduzida e a proteção sobre a fiação dificultaram a manutenção dos módulos, de modo que a troca e respectivo teste de cada um dos motores levou em torno de 90 minutos cada. Para uma aplicação real, esse tempo pode se tornar proibitivo para a ampla aplicação do robô em cenários não controlados. Com base nesses resultados, pela geometria do protótipo desenvolvido, já é possível definir que  $d_0 = d$  por conta da sobreposição dos módulos e  $M = 12$  módulos. Posteriormente para além dos parâmetros previamente definidos, será apresentada uma seleção de parâmetros da curva serpenoide e o seu efeito sobre a movimentação do mecanismo robótico completo e plenamente funcional após as correções descritas acima. <sup>2</sup>

#### 4.3.2.1 Primeira Onda *pitch-pitch*

Utilizando os parâmetros  $\alpha_v = 60^\circ$ ,  $k_v = 2$ ,  $\Delta_{vh} = 0$ ,  $\alpha_h = 0$  e  $k_h = 0$  nota-se o padrão de movimentação exposto no Vídeo "21° Teste Onda Pitch-Pitch" (ROCHA, 2023z). Esse padrão de movimentação pode ser resumido conforme o grupo de imagens Figura 4.40. Nesse conjunto, é possível verificar que o movimento parte do repouso na Figura 4.40a para a formação da primeira ondulação na Figura 4.40b e depois para a formação da segunda ondulação na Figura 4.40c. Depois a Figura 4.40d demonstra um ponto que para o modelo seria instável, mas com a grande quantidade de módulos apoiada, mantém a estabilidade no caso discreto. A forma da curva serpenoide não se preserva para o instante dessa figura, mas isso já é esperado em modelos discretos de sistemas mecatrônicos como esse. Depois volta-se a propagar a onda na Figura 4.40e e há uma pequena propulsão frontal do módulo como vista na Figura 4.40f. O movimento se repete a partir da Figura 4.40g. O deslocamento no sentido do corpo do robô aconteceu de maneira consistente, mas muito pequena. Não foi mensurado exatamente quais os valores de deslocamento para esse caso.

#### 4.3.2.2 Primeira onda *yaw*

Para aproveitar as configurações definidas acima para o robô, realizou-se uma rotação de  $90^\circ$  sobre todos os módulos. Dessa forma, os módulos inicialmente definidos como juntas *pitch* se tornaram as juntas *yaw* e vice-versa. Analogamente, os parâmetros que antes

<sup>2</sup> Todo o código desenvolvido para o controle do robô pode ser encontrado em <[https://github.com/deDeusThiago/Ereko\\_Snake\\_Robot](https://github.com/deDeusThiago/Ereko_Snake_Robot)>.

Figura 4.40 – Passos de movimentação para o 1º movimento filmado.

(a) 1º passo do movimento.



(b) 2º passo do movimento.



(c) 3º passo do movimento.



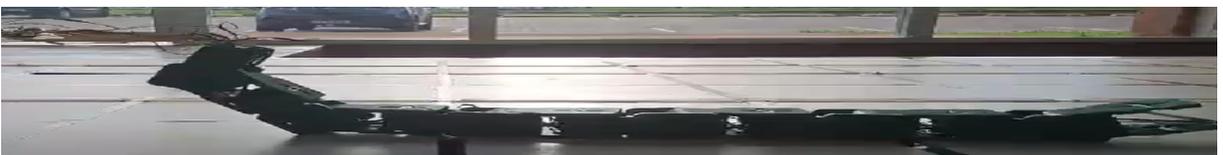
(d) 4º passo do movimento.



(e) 5º passo do movimento.



(f) 6º passo do movimento.



(g) 7º passo do movimento.



Fonte: o Autor.

descreviam a onda *pitch* passaram a descrever a onda *yaw* e vice-versa. Assim, efetivamente o que será visto é a repetição do caso anterior, porém para um movimento restrito à superfície de contato branca. O Vídeo "22° Teste de movimento yaw-yaw" (ROCHA, 2023p) contém todo o teste realizado em condições reais para a configuração de parâmetros definida aqui. A Figura 4.41 descreve esse teste em algumas etapas gráficas. Inicialmente, como no caso anterior, o sistema está em repouso Figura 4.41a. Posteriormente, em Figura 4.41b Figura 4.41c as ondulações surgem e se intensificam. Figuras Figura 4.41d e Figura 4.41e mostram a deformação natural e esperada do módulo discreto, mas que foge da curva serpenoide padrão contínua. A Figura 4.41f mostra o início da formação de uma nova onda serpenoide e a Figura 4.41g mostra sua propagação ao longo do corpo do encadeamento modular na tentativa de gerar movimento. Esse movimento entre as juntas se traduz em um pequeno deslocamento médio no sentido do corpo da cobra, como também em outro deslocamento no sentido perpendicular ao anterior. Não foram mensurados esses valores, mas eles são notáveis, especialmente no Vídeo "22° Teste de movimento yaw-yaw" (ROCHA, 2023p).

#### 4.3.2.3 Segunda Onda *yaw*

Realizando a mudança no parâmetro  $\alpha_h = 20^\circ$  e  $\alpha_v \rightarrow 0$  pode-se observar o movimento completo no Vídeo "25° Segundo teste movimento yaw" (ROCHA, 2023n). O Conjunto de imagens na Figura 4.42 demonstra algumas partes do movimento desenvolvido. A partir do repouso, como mostra Figura 4.42a, o conjunto mecânico inicia a formação de uma onda em seu lado esquerdo. Essa onda se propaga para o lado direito conforme visto na Figura 4.42b e mantém uma forma de curva serpenoide na Figura 4.42c, a qual realiza uma transição para a mostrada em Figura 4.42d. Após essa propagação de onda, o deslocamento fica visível na Figura 4.42e. Dessa forma, mesmo com diferentes configurações de parâmetros, o mesmo tipo de movimento ainda pode ser alcançado.

#### 4.3.2.4 Primeiro movimento *pitch-yaw*

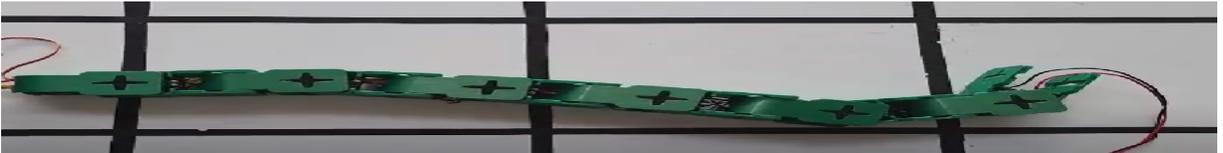
Utilizando os parâmetros  $\alpha_v = 30^\circ$ ,  $k_v = 3$ ,  $\Delta_{vh} = 30^\circ$ ,  $\alpha_h = 2$  e  $k_h = 30$  nota-se o padrão de movimentação exposto no Vídeo "23° Teste movimento Pitch Yaw" (ROCHA, 2023y). Esse padrão de movimentação pode ser resumido conforme o grupo de imagens na Figura 4.40. A partida do repouso em Figura 4.43a ocorre analogamente aos casos anteriores. Após uma transição marcada por variação rápida de ângulos, o robô atinge o estado estacionário de locomoção, com alteração visível de todas as suas juntas. Junto disso, ocorreram várias sequências de rolamento induzidos por uma escolha inadequada de parâmetros. Uma dessas pode ser vista em partes em Figura 4.43c e em Figura 4.43d. Por conta disso, alterou-se os parâmetros desse movimento empiricamente via tentativa e erro para suavizar a movimentação e reduzir a quantidade abrupta de colisões com o ambiente por meio de rotações ou rolagens indesejadas.

Figura 4.41 – Passos de movimentação para o 2º movimento filmado.

(a) 1º passo do movimento.



(b) 2º passo do movimento.



(c) 3º passo do movimento.



(d) 4º passo do movimento.



(e) 5º passo do movimento.



(f) 6º passo do movimento.



(g) 7º passo do movimento.



Fonte: o Autor.

Figura 4.42 – Passos de movimentação para o 3º movimento filmado.

(a) 1º passo do movimento.



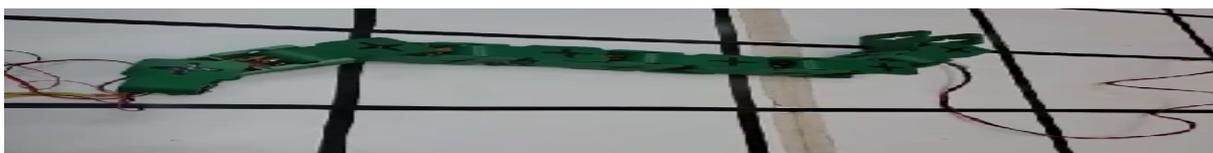
(b) 2º passo do movimento.



(c) 3º passo do movimento.



(d) 4º passo do movimento.



(e) 5º passo do movimento.



Fonte: o Autor.

Figura 4.43 – Passos de movimentação para o 4º movimento filmado.

(a) 1º passo do movimento.



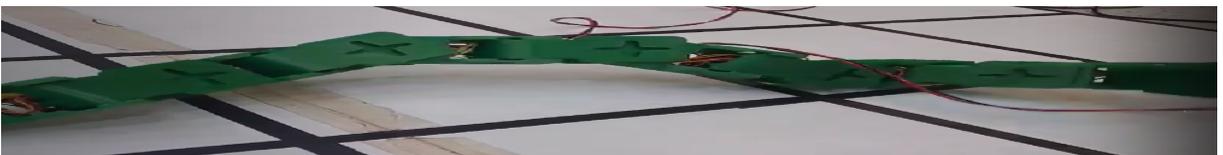
(b) 2º passo do movimento.



(c) 3º passo do movimento.



(d) 4º passo do movimento.



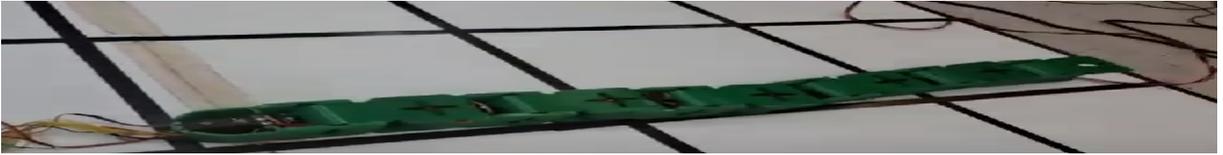
Fonte: o Autor.

#### 4.3.2.5 Segundo movimento *pitch-yaw*

Ao alterar os parâmetros  $\alpha_v = 30^\circ$ ,  $k_v = 3$ ,  $\Delta_{vh} = 10^\circ$ ,  $\alpha_h = 3$  e  $k_h = 30$  nota-se o padrão de movimentação exposto no Vídeo "24º Segundo teste movimento Pitch Yaw" (ROCHA, 2023m). Esse padrão de movimentação pode ser resumido conforme o grupo Figura 4.44 de Figuras. Nele, inicia-se a partir do repouso Figura 4.44a e após uma transição, chega-se no estado estacionário demonstrado pela Figura 4.44b. Dela para a Figura 4.44c, nota-se uma movimentação bem apoiada, com alterações suaves de toque do corpo do robô com o solo. O problema da rolagem indesejada não ocorre para essa configuração de parâmetros e o deslocamento observável no Vídeo "24º Segundo teste movimento Pitch Yaw" (ROCHA, 2023m) é considerável, mesmo que não mensurado quantitativamente, se comparado relativamente às dimensões do próprio módulo.

Figura 4.44 – Passos de movimentação para o 5º movimento filmado.

(a) 1º passo do movimento.



(b) 2º passo do movimento.



(c) 3º passo do movimento.



(d) 4º passo do movimento.



(e) 5º passo do movimento.



(f) 6º passo do movimento.



Fonte: o Autor.

### 4.3.3 Efeito da variação paramétrica da Onda serpenoide sobre a trajetória do Robô

Conforme descrito na [Tabela 2.1](#) diferentes tipos de locomoção de serpentes foram associadas a diferentes regiões do espaço de controle, ou seja, à diferentes conjuntos de parâmetros da Onda serpenoide. Como esse trabalho não se propõe a modelar dinamicamente o funcionamento do sistema robótico descrito, tem-se que a determinação exata das posições do robô a partir de uma configuração inicial de ângulos de junta não será um objetivo viável. No entanto, ainda é possível, dentro de um período fixo de tempo, observar qual o efeito de cada um dos parâmetros da Onda serpenoide sobre o deslocamento do conjunto modular.

Para que esses testes sejam realizados, um parâmetro de cada vez será alterado dentro de um pequeno intervalo, enquanto os outros são mantidos fixos. Após 15 períodos completos de oscilação, o sistema robótico finalizará sua locomoção e a posição de sua cauda será mensurada antes e depois em um plano bidimensional. Para realizar essa mensuração, será utilizada uma trena com resolução milimétrica. No entanto, na falta de um aparato adequado de fixação da trena e do observador em posição adequada e ergonômica pelo longo período de testes, só são identificáveis as posições em cm, de modo que a resolução adotada será de 1 cm, com erro instrumental analógico de 0,5 cm padrão. Resultados mais precisos podem ser obtidos na presença de outros sistemas de medição. O efeito dessa variação paramétrica será estudado para 3 tipos diferentes de movimentos classificados em ([GOMEZ, 2008](#)):

- *Normal sideways movement* ou movimento *yaw-yaw* puro;
- *Inclined sideways movement* ou movimento *pitch-yaw*;
- *Straight line* ou movimento *pitch-pitch*;

Para orientar espacialmente o processo de medição, a convenção de eixos XYZ apresentada na [Figura 2.4](#) será adotada ao longo dos testes a seguir.

#### 4.3.3.1 Efeito da variação paramétrica sobre o movimento *yaw-yaw*

Conforme descrito na [Tabela 2.1](#), esse movimento é dependente de 2 parâmetros: o ângulo de curvatura da onda  $\alpha_h$  e o seu número  $k_h$  de ondulações. A sua correspondente onda vertical mantém todos os ângulos de juntas fixos através da imposição de uma curvatura  $\alpha_v$  nula.

Primeiramente, busca-se verificar o efeito da variação de  $\alpha_h$ , ao se manter  $k_h = 2$  fixo. A fase  $\phi$  varia em múltiplos de  $30^\circ$ . Os resultados desse experimento podem ser vistos na [Tabela 4.7](#) e, para o conjunto escolhido de parâmetros, o aumento de  $\alpha_h$  resultou no aumento do deslocamento  $\Delta X$  medido na direção cauda para cabeça do conjunto. Os resultados

Tabela 4.7 – Efeito da variação de  $\alpha_h$  para o movimento *yaw-yaw* com  $k_h = 2$  fixo.

$\alpha_h$	$k_h$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
10	2	5	1
20	2	8	-3
30	2	10	6

Fonte: o Autor.

Tabela 4.8 – Efeito da variação de  $k_h$  para o movimento *yaw-yaw* com  $\alpha_h = 2$  fixo em  $30^\circ$ .

$\alpha_h$	$k_h$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
30	1	8	15
30	2	-14	-68
30	3	1	-23

Fonte: o Autor.

para o deslocamento na direção ortogonal não apresentam uma relação de proporção tão direta. Para  $\alpha_h = 10^\circ$ , tem-se deslocamento  $\Delta Y = 1$  cm. Posteriormente, para  $\alpha_h = 20^\circ$ , o deslocamento passa a ser  $\Delta Y = -3$  cm e por fim, para  $\alpha_h = 30^\circ$ , tem-se  $\Delta Y = 6$  cm. Dessa forma, o aumento de  $\alpha$  dentro do intervalo considerado não afeta de maneira conclusiva o deslocamento ortogonal, mas teve relação proporcional direta com o deslocamento no sentido cauda-cabeça no eixo x.

Por outro lado, para verificar o efeito da variação de  $k_h$ , ao se manter  $\alpha_h = 30^\circ$  fixo. A fase  $\phi$  varia em múltiplos de  $30^\circ$ . Os resultados desse experimento podem ser vistos na Tabela 4.8 e, dentro do intervalo considerado, o aumento de  $k_h$  não tem relação de proporção direta ou inversa clara com nenhum dos deslocamentos. Inicialmente, para  $k_h = 1$  o sistema apresenta um deslocamento  $\Delta X = 8$  cm e  $\Delta Y = 15$  cm. Ao alterar  $k_h$  para 2, os deslocamentos se tornam  $\Delta X = -14$  cm e  $\Delta Y = -68$  cm. Por último, ao alterar  $k_h$  para 3, os deslocamentos se tornam  $\Delta X = -1$  cm e  $\Delta Y = -23$  cm.

#### 4.3.3.2 Efeito da variação paramétrica sobre o movimento *pitch-pitch*

Em termos de descrição paramétrica para o movimento *pitch-pitch*, pode-se dizer que ela é a mesma que no movimento *yaw-yaw* supracitado, porém para o conjunto oposto de juntas, ou seja, para o conjunto de juntas *pitch*. Por conta disso, a análise desenvolvida será análoga, variando  $\alpha_v$  para  $k_v$  fixo e variando  $k_v$  para  $\alpha_v$  fixo. É importante notar que a trajetória seguida pelo mecanismo varia consideravelmente com pequenos erros angulares nas juntas opostas do tipo *yaw*, de modo que, para alguns casos de teste, foi observado tombamento análogo ao movimento de rolagem, o que fez que com que alguns dos teste precisassem ser feitos mais de uma vez.

Inicialmente, para  $k_v = 3$  fixo, variou-se  $\alpha_v$  entre os valores de  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . Para

Tabela 4.9 – Efeito da variação de  $\alpha_v$  para o movimento *pitch-pitch* com  $k_v = 3$  fixo.

$\alpha_v$	$k_v$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
20	3	20	-1
30	3	20	-28
45	3	-30	-28

Fonte: o Autor.

Tabela 4.10 – Efeito da variação de  $k_v$  para o movimento *pitch-pitch* com  $\alpha_v = 45$  fixo.

$\alpha_v$	$k_v$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
45	1	-16	-9
45	3	-30	-28
45	4	52	-41

Fonte: o Autor.

$\alpha_v = 20^\circ$ , os deslocamentos medidos foram de  $\Delta X = 20$  cm e  $\Delta Y = -1$  cm. Para  $\alpha_v = 30^\circ$ , mediu-se  $\Delta X = 20$  cm e  $\Delta Y = -28$  cm e para  $\alpha_v = 45^\circ$ , os deslocamentos medidos foram de  $\Delta X = -30$  cm e  $\Delta Y = -28$  cm. Dessa forma, dentro do conjunto de valores considerado, o aumento em  $\alpha_v$  não altera o valor do deslocamento no sentido cauda-cabeça entre 20 e 30°, mas um aumento que chegasse até 45° seria suficiente para inverter o sentido de deslocamento previamente aplicado pelo robô. Para o deslocamento no sentido ortogonal  $\Delta Y$ , a transição de 20° para 30° gerou considerável mudança de deslocamento, porém essa ficou estagnada no intervalo de 30° para 45°. Esses resultados são sintetizados em [Tabela 4.9](#).

Considerando o caso de inclinação  $\alpha_v = 45^\circ$  fixa. A variação de K de 1 até 4 gerou os seguintes resultados de deslocamento. Para  $k_v = 1$ , o deslocamento  $\Delta X$  foi de -16 cm e o deslocamento  $\Delta Y$  foi de -9 cm. Para  $k_v = 2$  o movimento apresentado pelo conjunto mecatrônico foi classificado como perigoso em termos de integridade física do mecanismo pela grande quantidade de colisões e tombamentos ocorrentes durante a fase de testes. Especula-se que esse padrão de movimentação não respeite as limitações físicas do robô modular, de modo a posicioná-lo em um conjunto particular de ângulos que inviabilize sua locomoção de maneira suave e sem colisões com o ambiente. Para  $k_v = 3$ , notou-se  $\Delta X = -30$  cm e  $\Delta Y = -28$  e para  $k_v = 4$ , notou-se  $\Delta X = -52$  cm e  $\Delta Y = -41$ . Assim, o aumento de  $k_v$  não apresenta uma relação proporcional direta com os deslocamentos obtidos, uma vez que o primeiro aumento o sentido é preservado, mas no segundo de  $k_v = 3$  para  $k_v = 4$ , o deslocamento, apesar de aumentar, tem seu sentido invertido. O deslocamento  $\Delta Y$  tem o seu aumento vinculado ao aumento de  $k_v$ . Os resultados obtidos com esses testes estão sintetizados na [Tabela 4.10](#).

Tabela 4.11 – Efeito da variação de  $\alpha$  para o movimento *pitch-yaw* com  $\beta = 30^\circ$  e  $k_v = k_h = 3$ .

$\alpha$	$k$	$\beta^\circ$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
10	3	30	16	-38
30	3	30	18	40
50	4	30	-43	-38

Fonte: o Autor.

#### 4.3.3.3 Efeito da variação paramétrica sobre o movimento *pitch-yaw*

Conforme a descrição realizada por (GOMEZ, 2008), o movimento *inclined sideways movement* é um dos tipos possíveis de locomoção *pitch-yaw* que restringe o espaço de controle do robô para apenas 3 parâmetros:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $k$ . Em relação às ondas verticais e horizontais utilizadas na descrição matemática do movimento de robôs cobra discretos, a relação entre esses parâmetros é:  $\alpha_h = \alpha \cdot \cos(\beta)$ ;  $\alpha_v = \alpha \cdot \sin(\beta)$ ;  $k_h = k_v = k$  sem defasagem entre as ondas horizontal e vertical, ou seja, com  $\Delta\phi_{vh} = 0$ . Dessa forma, investigar o efeito paramétrico nesse tipo de movimento significa, dentro do escopo desse trabalho, investigar o efeito de cada um dos 3 parâmetros do espaço de controle, um de cada vez, dentro de uma região de interesse, enquanto se considera os outros parâmetros como fixos. A fase  $\phi$  considerada dentro dos testes aqui apresentados também será, como nos casos anteriores, múltipla de  $30^\circ$  e 15 ciclos de oscilação completos do sistema robótico são considerados.

O primeiro caso, resumido em Tabela 4.11 busca estudar o efeito da variação de  $\alpha$  sobre a trajetória do mecanismo. Para isso são fixados  $k = 3$  e  $\beta = 30^\circ$ . Inicialmente, para  $\alpha = 10^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -16$  cm e  $\Delta Y = -38$  cm. Para  $\alpha = 30^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = 18$  cm e  $\Delta Y = 40$  cm e por último, para  $\alpha = 50^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -43$  cm e  $\Delta Y = 34$  cm. Assim, pode-se notar que o aumento de  $\alpha$  tem um efeito de aumento no deslocamento  $\Delta X$ , o qual, no entanto, vem acompanhado de alterações no sentido da trajetória. Já para o deslocamento  $\Delta Y$ , o efeito já não é de aumento de deslocamento ao longo do intervalo observado, mas as alterações de sentido do movimento continuam ocorrendo.

O segundo caso, resumido em Tabela 4.12 busca estudar o efeito da variação de  $k$  sobre a trajetória do robô. Para isso são fixados  $\alpha = 15^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$ . Inicialmente, para  $k = 1$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -16$  cm e  $\Delta Y = 0$  cm. Para  $k = 2$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -11$  cm e  $\Delta Y = -38$  cm e por último, para  $k = 3$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -27$  cm e  $\Delta Y = 26$  cm. Em ambos os casos, tanto para  $\Delta X$  quanto para  $\Delta Y$  não há relação observável de crescimento de deslocamentos de acordo com o crescimento do número de ondulações  $k$ . Um ponto notável é que, para  $\Delta Y$ , o aumento de  $K$  gera alteração no sentido de deslocamento.

Por último, o terceiro caso busca estudar o efeito da variação de  $\beta$  sobre a trajetória do referido sistema mecatrônico. Para isso são fixados  $\alpha = 15^\circ$  e  $k = 3$ . Inicialmente, para

Tabela 4.12 – Efeito da variação de  $k$  para o movimento *pitch-yaw* com  $\beta = 30^\circ$  e  $\alpha = 15^\circ$ .

$\alpha$	$k$	$\beta^\circ$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
15	1	30	-16	0
15	2	30	-11	-38
15	3	30	-27	26

Fonte: o Autor.

Tabela 4.13 – Efeito da variação de  $\beta$  para o movimento *pitch-yaw* com  $k = 3$  e  $\alpha = 15^\circ$ .

$\alpha$	$k$	$\beta^\circ$	$\Delta X$ [cm]	$\Delta Y$ [cm]
15	3	30	-27	26
15	3	45	-24	0
15	3	60	-6	9

Fonte: o Autor.

$\beta = 30^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -27$  cm e  $\Delta Y = 26$  cm. Para  $\beta = 45^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -24$  cm e  $\Delta Y = 0$  cm e por último, para  $\beta = 60^\circ$ , os deslocamentos observados foram  $\Delta X = -6$  cm e  $\Delta Y = 9$  cm. Para  $\Delta X$ , é notável que o aumento de  $\beta$  faz com que o deslocamento no sentido cauda-cabeça diminua. Por outro lado, a relação do aumento de  $\beta$  não apresenta uma relação direta e única com os resultados obtidos para  $\Delta Y$ . Os testes realizados para o terceiro caso estão sumarizados na [Tabela 4.13](#).

Ao longo da seção de Controle Computacional, foram implementados os algoritmos necessários para a movimentação do protótipo de robô desenvolvido. Inicialmente foram feitas os testes de funcionamento e amplitude de atuação para os respectivos motores. Uma vez que o funcionamento de cada um dos motores foi atestado, fez-se a coordenação de movimento entre cada uma das juntas do mecanismo proposto. Para três tipos de movimento diferente, foi avaliado qualitativamente e quantitativamente, o comportamento do robô em termos de trajetória no espaço e de auto-configuração geométrica. Os resultados observados comprovam que o protótipo desenvolvido consegue acompanhar mecanicamente o que é imposto pela estratégia de Controle por computador, desde que essa leve em conta as limitações mecânicas do projeto e do ambiente no qual o robô está inserido.

## 5 Conclusão

Conforme descrito ao longo do trabalho, o desenvolvimento de um robô modular de geometria manipulável e de baixo custo impõe muitos desafios, desde o ponto de vista do projeto mecânico aplicado à manufatura aditiva, como também da indução da anisotropia de atrito superficial. Eletronicamente, garantir que o circuito do conjunto modular está recebendo integralmente todos os sinais elétricos necessários é também um grande desafio, pois qualquer erro de alimentação ou de transmissão de dados afeta vigorosamente a posição final do mecanismo testado. Computacionalmente, foi importante verificar e garantir que a estratégia de coordenação de juntas proposta é suficiente para promover a locomoção desejada do conjunto, assim como manter uma boa comunicação entre o microcontrolador e a placa PCA 9685.

Em termos de projeto mecânico, conseguiu-se implementar um módulo de dimensões reduzidas que conseguiu encapsular com sucesso tanto o servomotor escolhido como também os fios necessários para o projeto conforme o esquema elétrico e eletrônico proposto. A conexão entre os módulos foi feita sem problemas de excesso ou falta de folga entre os componentes, favorecendo a montagem sem abrir mão da precisão, considerando as margens de incerteza inerentes aos componentes e ao método de montagem escolhido. Para algumas configurações de parâmetros de movimentação do sistema mecatrônico, este apresentava tombamentos não previstos, o que possivelmente indica posição desfavorável do seu centro de massa para um conjunto específico de parâmetros não extensivamente estudado nesse trabalho.

Já para o projeto eletrônico e elétrico, o esquema de montagem escolhido gerou uma topologia elétrica com uma quantidade reduzida de fios e conexões elétricas de modo a minimizar a massa do conjunto mecânico, reduzindo esforços sobre os motores, além de garantir bom intervalo angular entre as juntas do mecanismo e também uma boa transmissão elétrica ao longo do período de testes conjuntos de motores em movimentação, sem interrupções nas conexões ou necessidade de trocas de componentes uma vez que seu funcionamento foi extensivamente comprovado por testes preliminares descritos ao longo do trabalho. No entanto, ainda na fase de testes preliminares unitários, ao fim das conexões elétricas iniciais, foram constatadas 2 falhas nos motores antigos de número 6 e número 9. Por conta do esquema de montagem elétrico/eletrônico escolhido, a troca de peças e a manutenção nesse módulo ficam extremamente comprometidos, de modo a exigir uma grande quantidade de horas no dia para que os problemas fossem corrigidos.

Em termos de controle computacional, ao fim das primeiras conexões elétricas e com o final dos testes unitários nos motores, foi possível atestar o funcionamento coordenado

dos motores, garantindo a confiabilidade da comunicação entre placa PCA 9685 e microcontrolador. Posteriormente, também nos testes conjuntos, percebeu-se que a estratégia de osciladores senoidais era capaz de gerar propagação da onda serpenoide ao longo do corpo do conjunto mecatrônico e que essa propagação era capaz de gerar deslocamento do robô em relação ao seu referencial estático determinado por um ponto no chão via experimentos. Por meio desses experimentos, conseguiu-se atestar a capacidade tanto qualitativa quanto quantitativa de deslocamento do robô por meio dos 3 tipos de movimentos propostos: *pitch-pitch*, *pitch-yaw* e *yaw-yaw*. Por meio da variação paramétrica de cada um dos elementos dos respectivos espaços de controle dos movimentos propostos, dentro de um intervalo escolhido arbitrariamente, foi possível iniciar uma exploração empírica e completamente preliminar do efeito de cada um dos parâmetros variados na trajetória do sistema bioinspirado proposto ao longo desse trabalho.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Para dar prosseguimento ao desenvolvimento de estudos voltados para locomoção de mecanismos bioinspirados em cobras focados em situações de busca e resgate, é importante que se insira no modelo desenvolvido aqui um conjunto de sensores responsáveis para a identificação do terreno e planejamento de trajetórias que consigam contornar os trajetos classificados internamente através de diferentes métricas. O planejamento de trajetórias pode ser melhor implementado se for desenvolvido um modelo dinâmico do sistema mecânico encadeado implementado que leve em conta tanto as interações mecânicas do robô entre cada uma de suas juntas, seja por esforços de motor ou de atrito entre peças, como também as interações do conjunto modular com o seu ambiente. O desenvolvimento desse modelo dinâmico também está vinculado a uma boa estimativa dos parâmetros do modelo durante o processo de identificação do sistema. Diferentes métricas de identificação podem gerar diferentes resultados na modelagem do robô considerado, de modo que também seria factível visualizar um trabalho especificamente focado em qual dos algoritmos de estimativa uma resposta mais rápida ou com o menor erro considerados os critérios definidos para a estimativa.

Adicionalmente, por conta da geometria regular lateral do protótipo, também faz sentido estudar qual é o efeito da inclusão de placas de atrito anisotrópico sobre a trajetória do robô desenvolvido neste trabalho, de modo análogo ao trabalho desenvolvido em (ROCHA, 2023a) e como exemplificado em [Figura 4.33](#).

# Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*. Rio de Janeiro, 2012. 4 p. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/23327/nbr5410-instalacoes-eletricas-de-baixa-tensao>>. Citado na p. 72.
- AUDIONICA, N. *Tabela de fios AWG*. 2012. Disponível em: <[https://www.if.ufrgs.br/~mittmann/tabela\\_de\\_fios.pdf](https://www.if.ufrgs.br/~mittmann/tabela_de_fios.pdf)>. Citado na p. 72.
- BERTHET-RAYNE, P.; LEIBRANDT, K.; KIM, K.; SENECCI, C. A.; SHANG, J.; YANG, G.-Z. Rolling-joint design optimization for tendon driven snake-like surgical robots. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [s.n.], 2018. p. 4964–4971. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8593517>>. Citado na p. 22.
- BRANYAN, C.; HATTON, R. L.; MENGÜÇ, Y. Snake-inspired kirigami skin for lateral undulation of a soft snake robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 5, n. 2, p. 1728–1733, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8972388>>. Citado nas pp. 36 e 37.
- BRAQUEHAIS, J.; MORAIS, M. Determinação experimental da aceleração da gravidade com pêndulo simples e câmeras digitais. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/282913685\\_Determinacao\\_Experimental\\_da\\_Aceleracao\\_da\\_Gravidade\\_com\\_Pendulo\\_Simples\\_e\\_Cameras\\_Digitais](https://www.researchgate.net/publication/282913685_Determinacao_Experimental_da_Aceleracao_da_Gravidade_com_Pendulo_Simples_e_Cameras_Digitais)>. Citado nas pp. 69 e 70.
- CHEMBULY, V. S.; VORUGANTI, H. K. An efficient approach for inverse kinematics and redundancy resolution of spatial redundant robots for cluttered environment. *SN Applied Sciences*, Springer, v. 2, p. 1–20, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-2825-x>>. Citado na p. 22.
- CRAIG, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson/Prentice Hall, 2005. (Addison-Wesley series in electrical and computer engineering: Control engineering). ISBN 9780131236295. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ZJkOSgAACAAJ>>. Citado nas pp. 20 e 21.
- DENAVID, J.; HARTENBERG, R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. American Society of Mechanical Engineers, 1955. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanics/article/22/2/215/1110292/A-Kinematic-Notation-for-Lower-Pair-Mechanisms>>. Citado na p. 22.
- ETC. *MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo*. [S.l.], 2000. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf-file/839879/ETC/MG995/1>>. Citado nas pp. 44, 45, 47, 52, 53, 69, 70, 72, 78 e 82.
- GALEMBECK, T. F. *PROCESSO PARA MEDICAO E AVALIACAO DE ATRITO COM FINS DE FACILITAR MOVIMENTACAO DE ROBO APODE*. Tese (Trabalho de Graduação) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2018. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/24285>>. Citado nas pp. 34, 42, 43, 44, 55, 58 e 60.

GOMES, V. C. *Simulação do Atrito Anisotrópico para Movimentação de Robô Ápode Bioinspirado*. Tese (Trabalho de Graduação) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2023. Citado nas pp. 34, 43, 44, 46, 55 e 58.

GOMES, V. H. P.; ROCHA, T. d. D. L.; KOIKE, C. C.; VIANA, D. M.; SILVA, J. Y. M. A. da. A locomotion algorithm for an apodal robot to climb and descend steps. *Synergetic Cooperation between Robots and Humans. CLAWAR 2023 Proceedings*, 2023. Citado nas pp. 42 e 65.

GOMEZ, J. G. *Modular robotics and locomotion: application to limbless robots*. Tese (Doutorado) — Universidad Autonoma de Madrid, 2008. Citado nas pp. 17, 23, 24, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 91 e 94.

HIBBELER, R. *Estática: MECÂNICA PARA ENGENHARIA*. PEARSON BRASIL, 2017. ISBN 9788543016245. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=CL0ctgEACAAJ>>. Citado nas pp. 46 e 69.

HU, D. L.; NIRODYA, J.; SCOTTA, T.; SHELLEYA, M. J. The mechanics of slithering locomotion. 2008. Disponível em: <<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0812533106>>. Citado nas pp. 34 e 35.

KAMEGAWA, T.; AKIYAMA, T.; SAKAI, S.; FUJII, K.; UNE, K.; OU, E.; MATSUMURA, Y.; KISHUTANI, T.; NOSE, E.; YOSHIZAKI, Y.; GOFUKU, A. Development of a separable search-and-rescue robot composed of a mobile robot and a snake robot. *Advanced Robotics*, Taylor & Francis, v. 34, n. 2, p. 132–139, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1691941>>. Citado na p. 14.

LILJEBÄCK, P.; PETTERSEN, K. Y.; STAVDAHL, ; GRAVDAHL, J. T. *Snake Robots Modelling, Mechatronics, and Control*. Industrial Control Centre, Glasgow, Scotland, UK: Springer, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-2996-7>>. Citado nas pp. 17 e 34.

LIU, B.; LIU, M.; LIU, X.; TUO, X.; WANG, X.; ZHAO, S.; XIAO, T. et al. Design and realize a snake-like robot in complex environment. *Journal of Robotics*, Hindawi, v. 2019, 2019. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jr/2019/1523493/>>. Citado na p. 41.

LIU, J.; TONG, Y.; LIU, J. Review of snake robots in constrained environments. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 141, p. 103785, 2021. ISSN 0921-8890. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103785>>. Citado nas pp. 14 e 15.

MARVI, H.; MEYERS, G.; RUSSELL, G.; HU, D. L. Scalybot: A Snake-Inspired Robot With Active Control of Friction. *ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, Volume 2*, 2011. Disponível em: <<https://birth.engineering.asu.edu/wp-content/uploads/2016/07/scalybot-a-snake-inspired.pdf>>. Citado na p. 35.

NXP. *PCA9685 : 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller*. [S.l.]. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/424208/NXP/PCA9685.html>>. Citado nas pp. 49 e 77.

ROCHA, G. B. *Análise Experimental de Aspectos de Comunicação, Construção e Atrito de Robô Ápode Bioinspirado*. Tese (Trabalho de Graduação) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2023. Citado nas pp. 34, 42, 43, 44, 51, 55, 58, 60 e 97.

ROCHA, T. de D. L. *1º teste de movimentação com todos os módulos de 0 a 180° e até 0*. 2023. <<https://youtu.be/NkYbDJoczeE>>. Citado na p. 83.

ROCHA, T. de D. L. *Continua teste motor 6*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/jh1ar8dyGec>>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *Coordenação de 4 motores*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/o6bFphcQX-c>>. Citado na p. 81.

ROCHA, T. de D. L. *Coordenação mais rápida*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/M88XH26j0T0>>. Citado na p. 81.

ROCHA, T. de D. L. *Erro de teste no motor 6*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/Yd41Ay7efJ4>>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *Explicação Projeto Elétrico e Teste do motor 1*. 2023. <<https://youtu.be/D6bgiWBbXEA>>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *movimenta 4 módulos em diferentes velocidades*. 2023. <<https://youtu.be/LRmHLq-2f2U>>. Citado na p. 83.

ROCHA, T. de D. L. *Movimento yaw-yaw mal coordenado*. 2023. <<https://youtu.be/JLth3kvGXpU>>. Citado na p. 83.

ROCHA, T. de D. L. *Primeiro teste para junta pitch*. 2023. <[https://youtube.com/shorts/zp5Bt\\_MB8SY](https://youtube.com/shorts/zp5Bt_MB8SY)>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *Primeiro teste placa PCA 9685*. 2023. <<https://youtu.be/NRVcBwqkiaE>>. Citado na p. 81.

ROCHA, T. de D. L. *Primeiro teste yaw*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/CRMiHnG1NyI>>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *Segundo teste movimento Pitch Yaw*. 2023. <<https://youtu.be/Ll-146dXkkA>>. Citado na p. 89.

ROCHA, T. de D. L. *Segundo teste movimento yaw*. 2023. <<https://youtu.be/YtVoj7egpRI>>. Citado na p. 86.

ROCHA, T. de D. L. *Segundo teste pitch*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/H5yyIaTzWyY>>. Citado na p. 82.

ROCHA, T. de D. L. *Teste de movimento yaw-yaw*. 2023. <<https://youtu.be/Y139Wc9KDeE>>. Citado na p. 86.

ROCHA, T. de D. L. *Teste de torque*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/5oB7AbiHosY>>. Citado nas pp. 69 e 83.

ROCHA, T. de D. L. *Teste do motor 7*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/6jWj7nC6JFc>>. Citado na p. 83.

ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 3*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/7hhlrwpcbJE>>. Citado na p. 82.

- ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 4*. 2023. <<https://youtu.be/kwhhDuXSO4I>>. Citado na p. 82.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 5*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/ZICJ2ykMZPw>>. Citado na p. 82.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 8*. 2023. <<https://youtube.com/shorts/kFTb198mcMY>>. Citado na p. 83.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 9*. 2023. <[https://youtu.be/kh\\_rZ\\_TH88o](https://youtu.be/kh_rZ_TH88o)>. Citado na p. 83.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste motor 9 funcionando*. 2023. <[https://youtube.com/shorts/kqmEGNFao\\_U](https://youtube.com/shorts/kqmEGNFao_U)>. Citado na p. 83.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste movimento Pitch Yaw*. 2023. <<https://youtu.be/a5m-kkSHgLE>>. Citado na p. 86.
- ROCHA, T. de D. L. *Teste Onda Pitch-Pitch*. 2023. <<https://youtu.be/J4Dep5rnmBg>>. Citado na p. 84.
- SANFILIPPO, F.; AZPIAZU, J.; MARAFIOTI, G.; TRANSETH, A. A.; STAVDAHL, ; LILJEBÄCK, P. Perception-driven obstacle-aided locomotion for snake robots: The state of the art, challenges and possibilities †. *Applied Sciences*, v. 7, n. 4, 2017. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/7/4/336>>. Citado na p. 14.
- SERRANO, M. M.; CHANG, A. H.; ZHANG, G.; VELA, P. A. Incorporating frictional anisotropy in the design of a robotic snake through the exploitation of scales. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [s.n.], 2015. p. 3729–3734. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7139717>>. Citado nas pp. 35 e 36.
- SOUSA, A. C. C. de. *Sensors in Modular Robotics for Pipeline Inspection: Design and Test of Erekebot- Module*. 2014. Disponível em: <<http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/18088>>. Citado nas pp. 14, 41 e 46.
- SOUZA, N. C.; DUTRA, R.; BRITO, L.; VIANA, D.; KOIKE, C. Projeto e construção de um robô modular. In: *VI CONEM 2010 (Congresso Nacional de Engenharia Mecânica), Campina Grande, Brazil*. [s.n.], 2010. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-2215.pdf>>. Citado na p. 39.
- SOUZA, N. C. A.; OLIVEIRA, L. de; FRANCO, D.; FELIPPES, R.; SOUZA, M.; VIANA, D.; BRITO, B.; KOIKE, C. Erekebot alfa project: Design and construction of a modular robot prototype. In: *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. [s.n.], 2011. v. 1. Disponível em: <[https://abcm.org.br/symposium-series/SSM\\_Vol5/Section\\_VII\\_Robotics/25341.pdf](https://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol5/Section_VII_Robotics/25341.pdf)>. Citado na p. 40.
- TA, T. D.; UMEDACHI, T.; KAWAHARA, Y. Design of frictional 2d-anisotropy surface for wriggle locomotion of printable soft-bodied robots. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 6779–6785. Citado na p. 67.
- TA, T. D.; UMEDACHI, T.; SUZUKI, M.; KAWAHARA, Y. A printable soft-bodied wriggle robot with frictional 2d-anisotropy surface. *Journal of Information Processing*, Information Processing Society of Japan, v. 30, p. 201–208, 2022. Citado nas pp. 38 e 67.

TOWERPRO. *SG 90 9g Micro Servo*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf/791970/TowerPro/SG90/1>>. Citado nas pp. 44 e 45.

UMETANI, Y.; HIROSE., S. Biomechanical study of serpentine locomotion. *In Proc. of the 1st RoManSySymp*, p. 171–184, 1974. Citado nas pp. 15, 17 e 29.

WEI, H.; CHEN, Y.; TAN, J.; WANG, T. Sambot: A self-assembly modular robot system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 16, n. 4, p. 745–757, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5634125>>. Citado na p. 14.