



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Simulação do Atrito Anisotrópico para
Movimentação de Robô Ápode Bioinspirado**

Vinícius Carvalho Gomes

PROJETO FINAL DE CURSO
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Brasília
2023

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Simulação do Atrito Anisotrópico para
Movimentação de Robô Ápode Bioinspirado**

Vinícius Carvalho Gomes

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

Orientadora: Prof. Dr. Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike

Coorientadora: Prof. Dr. Dianne Magalhaes Viana

Brasília

2023

C331s Carvalho Gomes, Vinícius.
Simulação do Atrito Anisotrópico para Movimentação de Robô Ápode Bioinspirado / Vinícius Carvalho Gomes; orientador Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike; coorientador Dianne Magalhaes Viana. -- Brasília, 2023.
56 p.

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

1. Robótica Modular. 2. Atrito Anisotrópico. 3. Simulação. 4. Robô Apodal. I. Chagas e Cavalcante Koike, Carla Maria, orient. II. Magalhaes Viana, Dianne, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Simulação do Atrito Anisotrópico para Movimentação
de Robô Ápode Bioinspirado**

Vinícius Carvalho Gomes

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

Trabalho aprovado. Brasília, 25 de Julho de 2023:

**Prof. Dr. Carla Maria Chagas e
Cavalcante Koike, UnB/IE/CIC**
Orientadora

**Prof. Dr. Jones Yudi Mori Alves da Silva,
UnB/FT/ENM**
Examinador interno

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

**Prof. Dr. Dianne Magalhaes Viana,
UnB/FT/ENM**
Coorientadora

Brasília
2023

Resumo

O estudo da locomoção de robôs é essencial e os robôs são comumente classificados de acordo com os meios que utilizam para se mover, como rodas, esteiras, pernas ou o próprio corpo. Dentro desta última categoria, um grupo de robôs chamados "ápodes" apresenta uma locomoção bioinspirada na movimentação das cobras. Esse tipo de locomoção desperta interesse devido à sua versatilidade e agilidade, permitindo o acesso a espaços estreitos, como tubos ou destroços, que não são acessíveis por outros meios de locomoção.

Este trabalho tem como objetivo reunir estudos sobre a movimentação de cobras e robôs ápodes, com foco em entender os principais fatores que influenciam o deslocamento ápode. Por meio de simulações, será analisada a influência dos parâmetros da curva serpenóide de Hirose e do atrito anisotrópico no deslocamento dos robôs-cobra. Para realizar a simulação, será proposto um novo módulo para a construção de robôs ápodes com movimentação *yaw-yaw*.

Esta pesquisa contribui para uma melhor compreensão da locomoção ápode, investigando a relação entre a movimentação das cobras e os parâmetros de projeto dos robôs ápodes. No primeiro conjunto de simulações realizado, será demonstrado que é possível controlar o movimento serpentina por meio dos parâmetros da curva serpenoide de Hirose. Os resultados obtidos em simulação também destacam a importância do atrito anisotrópico para alcançar a locomoção serpentina, concluindo que é fundamental para o movimento que o coeficiente de atrito no sentido positivo seja o mais baixo possível. Por fim, será concluído que as placas de geometria fixa testadas não geram atrito anisotrópico suficiente para que o robô se propulsione para frente.

Palavras-chave: Robótica Modular. Atrito Anisotrópico. Simulação. Robô Apodal.

Abstract

The study of robot locomotion is essential, and robots are commonly classified according to the means they employ to move, such as wheels, tracks, legs, or their own body. Within the latter category, a group of robots called "apods" exhibits bioinspired locomotion based on the movement of snakes. This type of locomotion is of great interest due to its versatility and agility, allowing access to narrow spaces such as pipes or debris that are inaccessible to other means of locomotion.

This work aims to gather studies on snake movement and apod robots, with a focus on understanding the key factors that influence apod movement. Through simulations, the influence of the parameters of the Hirose serpenoid curve and anisotropic friction on the movement of snake robots will be analyzed. To perform the simulation, a new module will be proposed for the construction of apod robots with yaw-yaw movement.

This research contributes to a better understanding of snake-like locomotion, investigating the relationship between snake movement and the design parameters of apod robots. In the first set of simulations conducted, it will be demonstrated that it is possible to control serpentine movement through the parameters of the Hirose serpenoid curve. The simulation results also highlight the importance of anisotropic friction to achieve serpentine locomotion, concluding that it is essential for the movement that the friction coefficient in the positive direction is as low as possible. Finally, it will be concluded that the tested fixed-geometry plates do not generate enough anisotropic friction for the robot to propel itself forward.

Keywords: Modular Robotics. Anisotropic Friction. Simulation. Apodal Robot.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Robô ACM-R4, com rodas ativas e movimentação em 3 dimensões	15
Figura 2 – Robô ACM-R5 no ambiente de simulação CoppeliaSim	16
Figura 3 – Robô ACM-R7 com movimentação "serpenoide-oval"	16
Figura 4 – Locomoção auxiliada por obstáculos no robô Kullo	17
Figura 5 – Robô OmniTread OT-4, da University of Michigan	17
Figura 6 – Reprodução de anisotropia com mistura de material de alto atrito e material de baixo atrito	18
Figura 7 – Robô PYP, desenvolvido por González com conexão pitch-yaw	18
Figura 8 – Modelos Alpha v1(esquerda) e Alpha v2(direita)	19
Figura 9 – Modelo Sigma	20
Figura 10 – Robô Erekebot realizando movimentação <i>pitch-pitch</i>	21
Figura 11 – Elementos utilizados para reproduzir anisotropia	22
Figura 12 – Diferentes sentidos em que o atrito é medido para cada placa	22
Figura 13 – Modelos de placa propostos por Thaís de acordo com os resultados dos testes	23
Figura 14 – Modelos propostos para a série VDM	23
Figura 15 – Diferentes tipos de movimentação realizados por cobras	24
Figura 16 – Testes de escorregamento realizados com serpentes	26
Figura 17 – Tipos de conexão em robôs ápodes: (a) <i>Pitch-Pitch</i> (b) <i>Yaw-Yaw</i> (c) <i>Pitch-Yaw</i>	27
Figura 18 – Curva Serpenoide Contínua: a)Definição do ângulo α_s b)Comprimento l do corpo da cobra	28
Figura 19 – Influência do parâmetro 'a' na forma da curva	29
Figura 20 – Valor máximo para o parâmetro 'a' = $\frac{2\pi}{3}$	29
Figura 21 – Influência do parâmetro 'b' na forma da curva	30
Figura 22 – Influência do parâmetro 'c' na forma da curva	30
Figura 23 – Representação do posicionamento da junta	30
Figura 24 – Definição dos ângulos a serem atuados por um robô com 5 módulos	31
Figura 25 – Diferença da curva formada pelo robô para diferentes quantidades de módulos: M=6, M=8 e M=10	31
Figura 26 – Robô montado com módulos VDM-Y	32
Figura 27 – LilyPad Arduino (Esquerda) e Arduino Pro Mini (Direta)	33
Figura 28 – Modelo produzido em papelão	34
Figura 29 – Modelo criado no <i>software</i> Fusion	34
Figura 30 – Análise do torque necessário para levantar dois módulos	35
Figura 31 – Servo motor HS-85MG (esquerda) e MG995 (direita)	36
Figura 32 – Novo modelo criado no <i>software</i> Fusion	37

Figura 33 – Novo módulo com encaixe para placa de atrito	37
Figura 34 – Ambiente de simulação CoppeliaSim	40
Figura 35 – Ambiente de simulação Gazebo	42
Figura 36 – Influência do parâmetro ‘c’ no deslocamento lateral	44
Figura 37 – Influência do parâmetro ‘c’ no deslocamento linear	44
Figura 38 – Influência do parâmetro ‘b’ no deslocamento linear com $c = \frac{\pi}{6}$	45
Figura 39 – Influência do parâmetro ‘b’ no deslocamento linear com $c = \frac{\pi}{8}$	45
Figura 40 – Influência do parâmetro ‘a’ no deslocamento linear	46
Figura 41 – Influência da anisotropia no deslocamento linear para μ_1 constante e baixo	47
Figura 42 – Influência da anisotropia no deslocamento linear para μ_2 constante e alto	48
Figura 43 – Primeira geometria testada para induzir atrito anisotrópico, proposta por (GALEMBECK, 2018)	49
Figura 44 – Segunda geometria testada para induzir atrito anisotrópico, proposta por (ROCHA, 2023)	49
Figura 45 – Deslocamento linear observado do módulo com a primeira geometria proposta	49
Figura 46 – Ciclo completo de rotação observado para $\mu = 0.1$ (primeira geometria)	50
Figura 47 – Deslocamento linear observado do módulo com a segunda geometria proposta	50
Figura 48 – Ciclo completo de rotação observado para $\mu = 0.1$ (segunda geometria)	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros da Curva	28
Tabela 2 – Massas do primeiro módulo	35
Tabela 3 – Massas do segundo módulo	36
Tabela 4 – Massas do terceiro módulo	38

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno.....	34
ACM	<i>Active Chord Mechanism</i>	15
ROS	<i>Robot Operating System</i>	41
URDF	<i>Unified Robotics Description Format</i>	39
XML	<i>Extensible Markup Language</i>	39
YAML	<i>YAML Ain't Markup Language</i>	41

Lista de símbolos

d	Comprimento do módulo	29
d_0	Braço direito do módulo	29
F_a	Força de atrito	34
g	Aceleração da gravidade	34
i	i -ésima junta do robô	28
k	Número de ondulações na curva serpenoide contínua	27
l	Comprimento total da curva serpenoide contínua	27
m	Massa do módulo	34
S	Ponto ao longo da curva serpenoide contínua	27
a	Ângulo de enrolamento	28
b	Período ao longo do corpo do robô	28
c	Direção do movimento do robô	28
M	Número total de juntas no robô	28
α_S	Ângulo de referência no ponto S na curva serpenoide contínua	27
ϕ	Ângulo de inclinação entre dois módulos adjacentes	29

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.2	Organização do Trabalho	14
2	TRABALHOS CORRELATOS	15
2.1	Active Cord Mechanism	15
2.2	Robôs cobra sem rodas	17
2.3	Grupo Ereko	19
2.3.1	Módulos Alpha v1 e Alpha v2	19
2.3.2	Módulo Sigma	20
2.4	Estudos Sobre o Atrito	21
2.4.1	Modelo Proposto	22
2.4.2	Módulo série VDM	23
3	MODELO DE MOVIMENTAÇÃO EM ROBÔS ÁPODES	24
3.1	Movimentação de Serpentes	24
3.2	Movimentação em Robôs Ápodes	25
3.3	Curva de Movimentação	26
3.3.1	Discretização	27
3.3.2	Influência dos Parâmetros	28
3.3.3	Definição dos Ângulos	29
3.3.4	Posicionamento das Juntas	31
4	PROJETO DO MÓDULO	32
4.1	Princípios	32
4.2	Controlador	32
4.3	Primeiro Modelo	33
4.3.1	Análise do Torque	34
4.4	Segundo Modelo	36
4.4.1	Análise do Torque	36
4.5	Terceiro Modelo	37
4.5.1	Análise do Torque	38
5	VALIDAÇÃO DO MODELO EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	39
5.1	Descrição do modelo em URDF	39
5.2	CoppeliaSim	39

5.3	Gazebo	41
5.3.1	Alterações no código URDF	41
5.3.2	Controle	41
5.4	Testes	42
5.4.1	Influência dos parâmetros da curva de Hirose no deslocamento	43
5.4.1.1	Compensação do deslocamento lateral utilizando o parâmetro ‘c’	43
5.4.1.2	Influência do parâmetro ‘c’ no deslocamento linear	43
5.4.1.3	Influência do parâmetro ‘b’ no deslocamento linear	44
5.4.1.4	Influência do parâmetro ‘a’ no deslocamento linear	46
5.4.2	Influência da anisotropia no deslocamento linear	47
5.5	Teste da reprodução de anisotropia com placa de atrito	48
5.5.1	Geometria Completa	49
5.5.2	Geometria de barreiras laterais	50
6	CONCLUSÕES	52
6.1	Trabalhos Futuros	52
	REFERÊNCIAS	54

1 Introdução

A forma de locomoção ápole ainda é pouco explorada na robótica quando comparada com as formas mais usuais, como rodas, esteiras e até pernas. Contudo, a locomoção por meio do próprio corpo do robô apresenta muitas vantagens em cenários que não é possível utilizar as outras formas mais usuais de locomoção. Por apresentarem uma estrutura flexível e altamente adaptativa, robôs cobra têm mais facilidade para se deslocar em terrenos irregulares, passagens estreitas e avançar sobre obstáculos. Por esse motivo, as aplicações de robôs cobra são muito diversas e já existem estudos para utilização de robôs cobra em operações de busca e resgate em destroços e ambientes de difícil acesso (HAN et al., 2022), em inspeção de redes tubulares (SELVARAJAN et al., 2019) e até em missões de exploração espacial (MERZ et al., 2018).

A ideia de robô cobra geralmente vem associada à utilização da robótica modular. Na robótica modular, um robô é composto por N módulos que podem ser reconfigurados, permitindo que o robô possa assumir diferentes formas e configurações. A principal vantagem da robótica modular é sua flexibilidade e a versatilidade. Hoje já são estudados robôs modulares que conseguem se reconfigurar de forma autônoma, podendo mudar sua forma, e até sua forma de locomoção, a depender do ambiente em que está inserido (BRENER; BENAMAR; BIDAUD, 2004).

Um dos maiores desafios para a construção de um robô cobra é entender como o atrito influencia na movimentação dos ofídios e projetar os módulos do robô de forma a copiar mecanismos utilizados por esses animais. As serpentes se utilizam da propriedade anisotrópica do atrito proporcionada por suas escamas para direcionar o sentido do movimento, gerando um atrito maior no sentido perpendicular ao seu corpo e um atrito menor no sentido paralelo ao seu corpo. Um grande desafio encontrado na robótica é como reproduzir esse comportamento proporcionado pelas escamas nos módulos dos robôs construídos.

Além do atrito, outro fator importante para a movimentação de um robô cobra é a sua curva de movimentação. Shigeo Hirose propôs, a partir de seus estudos com serpentes em (HIROSE; YAMADA, 2009), uma descrição matemática para a forma do corpo de uma cobra durante sua movimentação. Essa descrição é até hoje amplamente utilizada na implementação de robôs ápoles e é conhecida como curva serpenoide, por sua semelhança com uma senoide.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é investigar, por meio de simulações, como o atrito e a escolha dos parâmetros da curva serpenoide de Hirose afetam o deslocamento de um robô ápode com movimento serpentina. O projeto irá se apoiar em estudos anteriores realizados pelo grupo de estudos Ereko da Universidade de Brasília. Para que o objetivo principal seja atingido, é necessário:

- Realizar a prototipagem virtual de um módulo capaz de realizar movimentação na configuração *yaw-yaw*, conforme (GÓMEZ, 2008);
- Identificar quais simuladores disponíveis permitem a simulação de atrito anisotrópico; e
- Comparar o deslocamento do robô, em simulação, para diferentes cenários de atrito e diferentes curvas de movimentação.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução. No segundo capítulo (2) serão revisados os trabalhos mais relevantes sobre robôs ápodes, assim como os trabalhos já realizados na Universidade de Brasília. No terceiro capítulo (3) são apresentados os estudos sobre movimentação em cobras e em robôs ápodes, é apresentada a curva de movimentação proposta para o robô bem como os códigos escritos para se obter os ângulos entres os módulos na curva. No quarto capítulo (4) será discutido o projeto do módulo e todos os componentes necessários para que este funcione corretamente. No quinto capítulo (5) serão analisados os testes e simulações realizados e os seus resultados. Por fim, no sexto capítulo (6) será feita uma recapitulação das principais conclusões e pontos discutidos neste trabalho e das expectativas e sugestões para trabalhos futuros.

2 Trabalhos Correlatos

O campo de pesquisa de robôs ápodes, apesar de não ser tão amplamente discutido como outras formas de locomoção, apresenta uma gama de estudos já realizados. Alguns dos mais relevantes estudos sobre movimentação ápode em robôs e os estudos já realizados na Universidade de Brasília serão apresentados nesta seção.

2.1 Active Cord Mechanism

Em 1972, Shigeo Hirose propôs o primeiro modelo de robô cobra, o ACM (*Active Cord Mechanism*). Desde então, diversos modelos da série ACM foram desenvolvidos. Os robôs da série ACM, como o ACM-R2 (TOGAWA; MORI; HIROSE, 2000), utilizam a movimentação *sinus-lifting*, movimento observado nas cobras em que partes de seu corpo não estão em contato com o solo ajudando a diminuir o escorregamento lateral e facilitando sua propulsão para frente.

Grande parte dos modelos da série ACM, como proposto no modelo ACM-R3 (MORI; HIROSE, 2001), possuem ao longo de seu corpo rodas passivas que têm o papel de reproduzir o atrito anisotrópico, ou seja, garantir que o atrito no sentido paralelo ao corpo do robô seja menor que o atrito no sentido perpendicular. Já alguns modelos mais recentes implementam rodas ativas a fim de otimizar o movimento em espaços limitados e com menos contato com o solo, como é o caso dos modelos ACM-R4 (YAMADA; HIROSE, 2006), mostrado na Figura 1, e ACM-R8 (KOMURA; YAMADA; HIROSE, 2015).

Figura 1 – Robô ACM-R4, com rodas ativas e movimentação em 3 dimensões

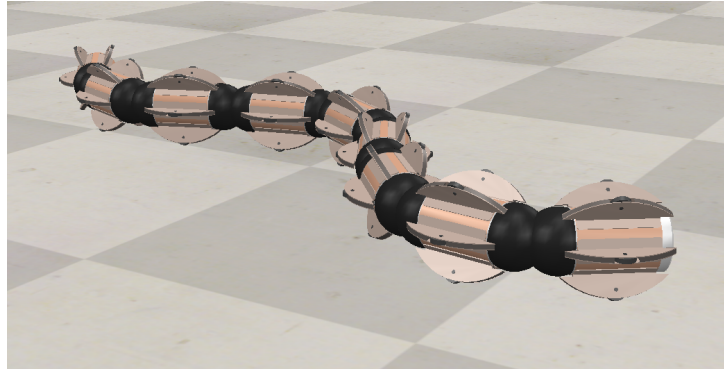


Fonte: (YAMADA; HIROSE, 2006)

O modelo ACM-R5 mostrado na Figura 2 é um robô anfíbio que, além de possuir rodas

passivas que permitem o movimento serpentina em terra, também possui características que possibilitam a sua locomoção na água por meio de movimentos espirais (TAKAYAMA; HIROSE, 2002).

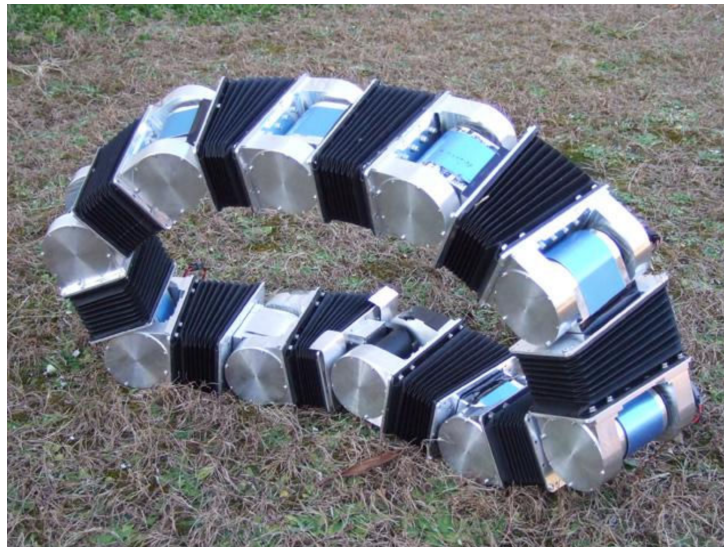
Figura 2 – Robô ACM-R5 no ambiente de simulação Coppeliasim



Fonte: Coppeliasim

Já o modelo ACM-R7, mostrado na Figura 3, implementa uma nova movimentação, chamada "serpenoide-oval", que permite que os módulos de cabeça e de cauda se conectem em uma forma oval (OHASHI; YAMADA; HIROSE, 2010). O robô se movimenta combinando o movimento serpentina com o movimento de esteira proporcionado por sua forma.

Figura 3 – Robô ACM-R7 com movimentação "serpenoide-oval"



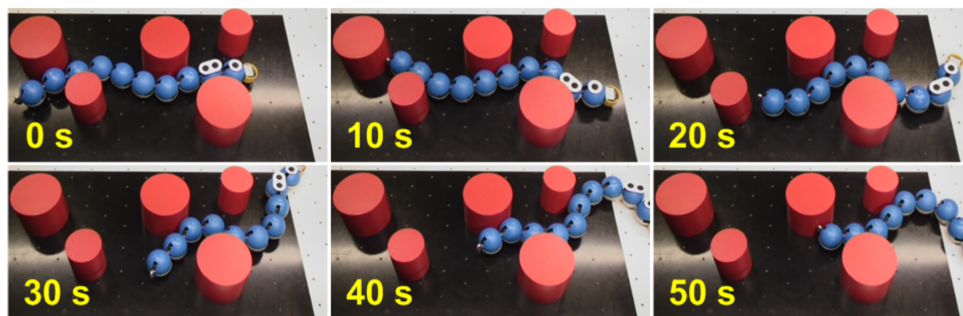
Fonte: (OHASHI; YAMADA; HIROSE, 2010)

Além de sua contribuição com todos os modelos do robô ACM, Hirose também foi o primeiro a descrever a curva serpenoide (HIROSE; YAMADA, 2009). A curva serpenoide descreve a forma ao longo do corpo da cobra durante o movimento serpentina, podendo ser discretizada para descrever a posição de cada módulo em um robô cobra. A curva serpenoide será abordada no Capítulo 3 deste trabalho.

2.2 Robôs cobra sem rodas

Além dos robôs da série ACM, outros estudos já foram realizados para a construção de robôs cobra sem rodas. Por exemplo o robô Kullo na [Figura 4](#), desenvolvido pela Norwegian University of Science and Technology ([LILJEBÄCK et al., 2011](#)), implementa a locomoção auxiliada por obstáculos, similar à movimentação concertina. O robô detecta os obstáculos presentes no ambiente e aplica pressão sobre eles para se impulsionar para frente.

Figura 4 – Locomoção auxiliada por obstáculos no robô Kullo



Fonte: ([LILJEBÄCK et al., 2011](#))

O robô OmniTread OT-4, mostrado na [Figura 5](#), desenvolvido pela Universidade de Michigan ([BORENSTEIN; BORRELL, 2008](#)), possui esteiras em todos os seus módulos que ajudam a impulsionar o robô para frente. Além disso, ele possui juntas pneumáticas entre seus módulos que podem ser acionadas de forma mais rígida, a fim de sustentar o corpo do robô e subir obstáculos ou andar dentro de tubos, ou de forma mais flexível, para se adaptar ao terreno e facilitar a locomoção em terrenos irregulares.

Figura 5 – Robô OmniTread OT-4, da University of Michigan

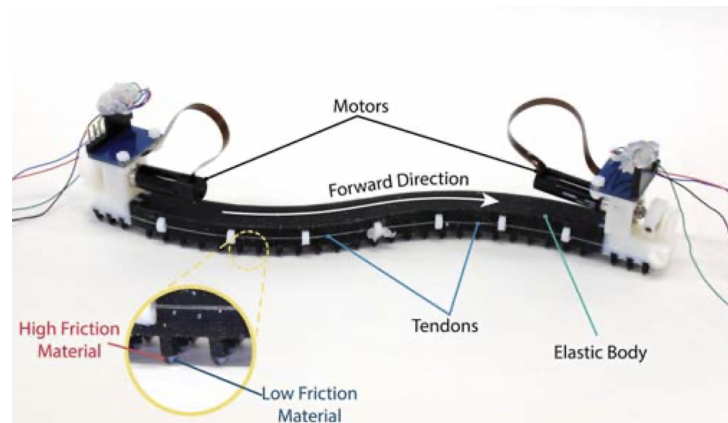


Fonte: ([BORENSTEIN; BORRELL, 2008](#))

Um importante trabalho da Universidade de Tokyo ([TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018](#)) reproduziu a característica anisotrópica das escamas das cobras anexando ao ventre do robô uma estrutura flexível combinada de material de baixo atrito com material de alto atrito, como mostrado na [Figura 6](#). Desta forma, em diferentes direções do movimento diferentes

materiais estão em contato com o solo, gerando anisotropia no atrito. Com essa estrutura, os pesquisadores afirmaram terem aumentado em 2.8 vezes a velocidade do deslocamento serpentina em seu robô.

Figura 6 – Reprodução de anisotropia com mistura de material de alto atrito e material de baixo atrito



Fonte: (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018)

Juan González Gómez em seu trabalho de 2008 (GÓMEZ, 2008) definiu uma nova forma de classificação para robôs modulares. Dentro da classificação, González diferencia robôs cobra de robôs serpentinos. Segundo González, os robôs serpentinos derivam sua propulsão de rodas ou esteiras ativas, como por exemplo o robô OmniTread na Figura 5. Já os robôs cobra derivam sua propulsão do próprio movimento corporal, como por exemplo o robô ACM-R5 na Figura 2.

Dentro da categoria de robôs cobra, González também definiu 3 subcategorias de acordo com o eixo de conexão entre dois módulos adjacentes. São definidos dois eixos de rotação: *pitch* e *yaw*. O eixo *yaw* é perpendicular ao solo e o eixo *pitch* é paralelo ao solo e perpendicular ao corpo do robô. Sendo assim, os robôs cobra são diferenciados entre *yaw-yaw*, como exemplo o robô Kullo na Figura 4, *pitch-yaw*, como exemplo o robô PYP desenvolvido por González na Figura 7, ou *pitch-pitch*, como exemplo o robô Erekebot na Figura 10.

Figura 7 – Robô PYP, desenvolvido por González com conexão pitch-yaw



Fonte: http://www.iearobotics.com/personal/juan/index_eng.html

2.3 Grupo Ereko

O Ereko é um grupo de pesquisa voltado para robótica modular de baixo custo na Universidade de Brasília que surgiu em 2009. Desde então o grupo desenvolveu alguns protótipos (a maioria para movimentação do tipo *pitch-pitch*) que serviram de base para a estruturação do presente trabalho. Alguns dos protótipos anteriores desenvolvidos(EREKO, 2015) serão apresentados nesta seção.

2.3.1 Módulos Alpha v1 e Alpha v2

Figura 8 – Modelos Alpha v1(esquerda) e Alpha v2(direita)



Fonte: (EREKO, 2015)

Os módulos Alpha v1 e Alpha v2 foram construídos a partir de uma série de princípios:

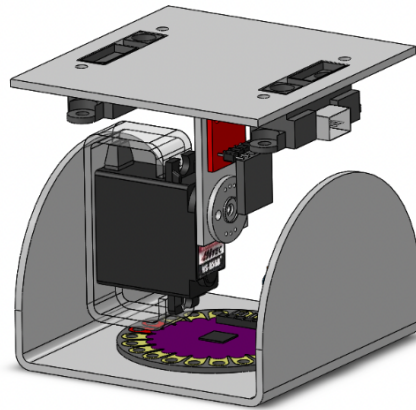
- A configuração de conexão entre os módulos deve permitir a alteração manual, podendo conectar um módulo a outro pelo topo e pela base (para o Alpha v1 e o Alpha V2) e também pelas laterais (somente no Alpha v1);
- O robô deve ser capaz de sustentar o peso dos módulos que estão suspensos durante o movimento (movimentação *pitch*);
- Conseguir armazenar todos os componentes necessários em seu interior;
- Possuir atrito nas faces que estão em contato com o chão de modo a evitar o escorregamento durante o movimento; e
- Possuir eixo de simetria no módulo no eixo de rotação.

Ambos os módulos são compostos pelos mesmos componentes:

- Um servo motor TGY-90S;
- Uma bateria Turnigy de tensão 3.7V;
- Um Microcontrolador ATmega8; e
- Placas de circuito.

2.3.2 Módulo Sigma

Figura 9 – Modelo Sigma



Fonte: (EREKO, 2015)

A partir dos experimentos realizados com a série Alpha, foram propostas alterações no módulo (em sua estrutura e seus componentes) e o módulo Sigma foi projetado. Este novo modelo apresenta algumas alterações nos princípios de desenvolvimento em relação aos modelos Alpha:

- A configuração de conexão entre os módulos deve permitir alteração manual, podendo haver conexão entre os módulos do tipo *pitch-pitch*, *yaw-yaw* e *pitch-yaw*;
- O robô deve ser capaz de sustentar o peso dos módulos que estão suspensos durante o movimento (movimentação *pitch*);
- Conseguir armazenar todos os componentes necessários em seu interior;
- Possuir atrito nas faces que estão em contato com o chão de modo a evitar o escorregamento durante o movimento;
- Possuir eixo de simetria no módulo no eixo de rotação;
- Maximizar o alinhamento do centro de massa com o centro geométrico do módulo;
- Maximizar a precisão dos sensores de distâncias acoplados à tampa;
- Possuir menor peso possível; e
- Evitar ao máximo folga na montagem dos componentes.

O módulo sigma foi projetado para conter os seguintes componentes:

- Um servo motor HS-85BB;
- Um módulo de comunicação XBee;
- Um controlador Lilypad Arduino;
- Placa de alimentação;
- Acelerômetro e giroscópio com 9 graus de liberdade I.M.U.; e
- Dois sensores de distância infravermelho.

O robô Erekebot (Figura 10) foi construído a partir da conexão de 5 módulos sigma. Atuando o Erekebot com os ângulos da curva de Hirose foi possível realizar a movimentação à frente em *pitch-pitch*.

Figura 10 – Robô Erekebot realizando movimentação *pitch-pitch*



Fonte: Grupo Ereko

2.4 Estudos Sobre o Atrito

Um dos principais fatores para a movimentação ápole é a análise de atrito. As cobras em sua movimentação se aproveitam da característica anisotrópica do contato de seus corpos com o solo, ou seja, em diferentes direções o contato do corpo com o chão apresenta diferentes valores de atrito. Os estudos realizados por David Hu mostram que as cobras utilizam suas escamas para reproduzir um contato irregular com o solo gerando essa característica anisotrópica. Testes de escorregamento com uma cobra mostraram que estas apresentam atrito variado em 3 direções diferentes. No sentido positivo do movimento o coeficiente de atrito é menor, dando mais facilidade ao deslocamento. Já no sentido negativo (contrário)

o atrito observado foi um pouco maior, enquanto no sentido lateral (perpendicular) do movimento o coeficiente de atrito foi o mais alto observado. (HU et al., 2008)

Um grande desafio na construção de robôs ápodes, principalmente nos capazes de realizar movimentação serpentina, é a reprodução da anisotropia apresentada por serpentes na natureza. Em seu trabalho realizado no grupo Ereko, (GALEMBECK, 2018) propôs um modelo de placa de atrito que poderia ser utilizada para simular em um módulo o efeito de atrito anisotrópico produzido pelas escamas nas cobras.

2.4.1 Modelo Proposto

A geometria proposta em (GALEMBECK, 2018) para reproduzir a anisotropia reuniu 3 elementos bioinspirados mostrados na Figura 11: a pele, as escamas e os microdermatoglitos, sendo a pele a parte acoplada aos módulos.

Figura 11 – Elementos utilizados para reproduzir anisotropia



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

A geometria deve gerar uma anisotropia no atrito nas diferentes direções definidas na Figura 12.

Figura 12 – Diferentes sentidos em que o atrito é medido para cada placa

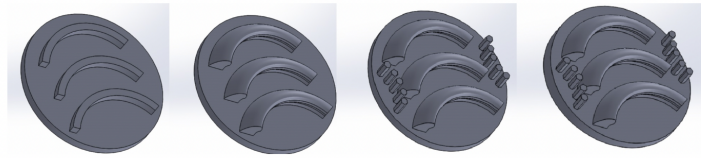


Fonte: (GALEMBECK, 2018)

Com base na observação dos testes e nos resultados obtidos foi proposto um modelo (Figura 13) para as placas que combina os principais fatores observados. Foi proposta uma placa com um número intermediário de cerdas, mas com maior espaçamento entre elas,

além de aumentar o ângulo de inclinação dos microdermatoglitos. Foi proposto também que houvesse um desnível entre os sentidos positivo e negativo a fim de aumentar a anisotropia.

Figura 13 – Modelos de placa propostos por Thaís de acordo com os resultados dos testes

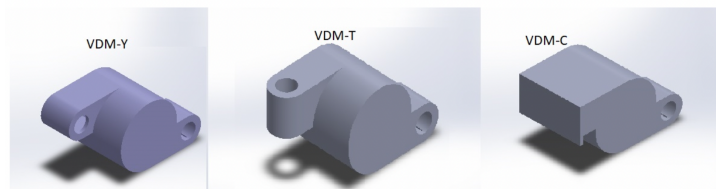


Fonte: (GALEMBECK, 2018)

2.4.2 Módulo série VDM

Com os módulos anteriormente propostos em (EREKO, 2015) foi possível obter a movimentação em *pitch-pitch* (Figura 17), porém não foi possível se obter movimento com as configurações *yaw-yaw* ou *pitch-yaw*. Um novo projeto de módulo proposto por (GALEMBECK, 2018) incorpora as placas de atrito a fim de introduzir anisotropia para permitir a movimentação do robô utilizando conexões *yaw*.

Figura 14 – Modelos propostos para a série VDM



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

Os módulos da série VDM foram propostos para que fosse possível aplicar o modelo de atrito apresentado, de forma a realizar movimentação em *yaw-yaw* (apenas com módulos VDM-Y) ou em *pitch-yaw* (módulos VDM-Y em conjunto com módulos VDM-T). Os módulos VDM-C foram apresentados como módulos para as extremidades do robô.

Este trabalho irá utilizar como base o módulo VDM-Y com o fim de se obter a movimentação em *yaw-yaw*. Serão propostas simplificações dos modelos, de forma que os módulos possuam apenas o necessário para a movimentação.

3 Modelo de Movimentação em Robôs Ápodes

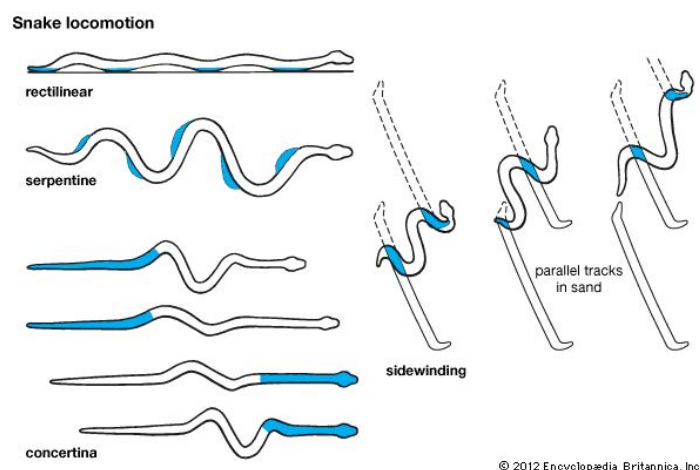
A biomimética é a área da ciência que estuda estratégias e mecanismos da natureza para reproduzi-los de forma a otimizar processos e máquinas criadas artificialmente. Não diferente das outras áreas da ciência, a robótica também se utiliza deste recurso. Na criação de robôs ápodes é observado o comportamento na locomoção de serpentes, os mecanismos utilizados e suas curvas de movimentação a fim de projetar os chamados “robôs cobra” que reproduzem essa movimentação.

Nesta seção será discutida a movimentação observada em cobras na natureza, os conceitos utilizados na robótica para movimentação de robôs ápodes e por fim a obtenção da curva de movimentação utilizada em robôs cobra.

3.1 Movimentação de Serpentes

Existem 4 grupos distintos que classificam o tipo de movimentação utilizado por serpentes, como exposto na [Figura 15](#). Em todos esses movimentos existe grande influência do atrito. (SEEJA; SELVAKUMAR AROCKIA DOSS; HENCY, 2022)

Figura 15 – Diferentes tipos de movimentação realizados por cobras



Fonte: <https://dickinsoncountyiowa.org/conservation/wp-content/uploads/sites/2/2018/02/snake-motion.jpg>

A movimentação concertina é utilizada quando o animal se encontra em espaços estreitos e com movimentos limitados. A serpente utiliza seu corpo e suas escamas para se ancorar nas paredes e impulsionar seu corpo para frente.

A movimentação retilínea é utilizada por serpentes maiores, que se movimentam em linha reta e mais lentamente, porém também de forma mais silenciosa para não afugentar as presas. Neste tipo de movimentação o animal contrai os músculos do ventre de forma a criar uma onda que percorre o corpo impulsionando-o para frente.

A movimentação por alças laterais (*sidewinding*) é geralmente utilizada em desertos por sua característica de manter a menor área de contato possível entre o ventre da serpente e a areia quente. Este também é o método que garante maior velocidade para a locomoção das cobras. Neste método são criadas alças ao longo do corpo do animal, mantendo apenas poucos pontos de ancoragem no solo. Essas alças são impulsionadas para os lados, alternando os pontos de ancoragem utilizados, permitindo assim que o animal se desloque de forma lateral. Sendo assim, a direção do movimento resultante não é paralela à direção longitudinal do corpo da serpente.

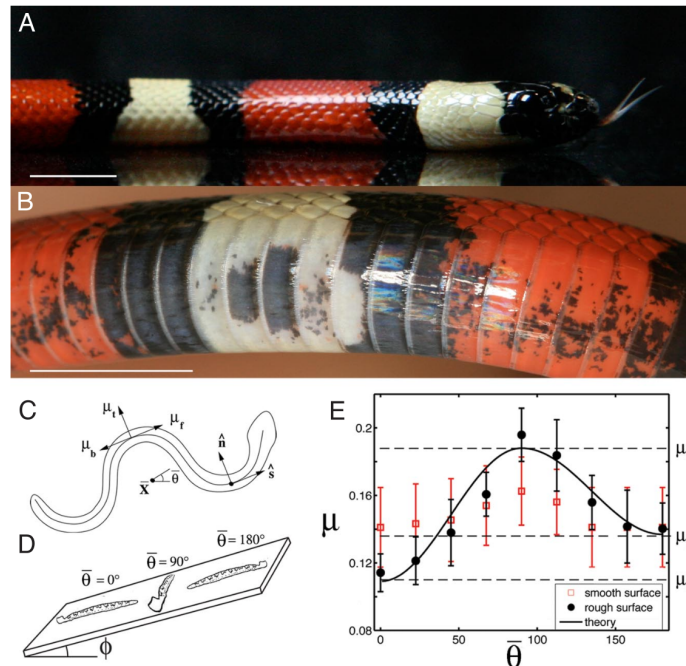
Por último, existe a movimentação serpentina. Esta é a forma de locomoção mais utilizada por serpentes e será a explorada neste trabalho. Neste tipo de movimentação o animal contrai seus músculos da cabeça em direção à cauda, fazendo movimentos com o corpo semelhantes a uma senoide. A direção do movimento resultante é paralela à direção longitudinal do corpo da serpente.

David Hu, a partir de testes realizados com serpentes vivas, demonstrou a importância do atrito para o movimento serpentina (HU et al., 2008). Foi mostrado que as escamas das serpentes exercem papel fundamental em controlar a direção preferível de deslizamento do animal. Ou seja, as escamas aumentam ou diminuem o atrito em diferentes direções dando à pele da cobra a característica de atrito anisotrópico. Por meio dos testes de escorregamento mostrados na Figura 16, (HU et al., 2008) mostrou que a cobra apresenta o maior coeficiente de atrito no sentido lateral, ou seja, perpendicular ao corpo da cobra, enquanto o menor coeficiente de atrito é observado no sentido positivo, ou seja, na direção da cauda à cabeça da serpente.

3.2 Movimentação em Robôs Ápodes

Para o deslocamento utilizando a movimentação serpentina, um robô deve ser capaz de reproduzir os movimentos realizados por uma cobra. Segundo (GÓMEZ, 2008), esses robôs cobra podem ser classificados quanto ao eixo de conexão entre dois módulos adjacentes. Dado um eixo de coordenadas fixo, o movimento de cada junta pode ser classificado quanto ao seu eixo de rotação. Uma conexão *yaw* permite rotação no eixo perpendicular ao solo. Já uma conexão *pitch* permite rotação no eixo paralelo ao solo e perpendicular ao corpo do robô. Desta forma, os robôs cobra podem ser classificados em 3 categorias diferentes mostradas na Figura 17, sendo estas:

Figura 16 – Testes de escorregamento realizados com serpentes



Fonte: (HU et al., 2008)

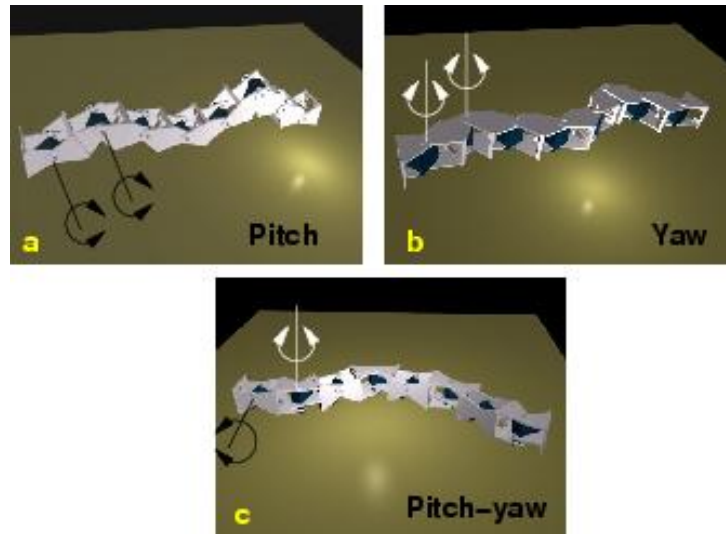
- *Pitch-Pitch*: todas as conexões entre os módulos do robô são do tipo *pitch*, o movimento ocorre em uma dimensão;
- *Yaw-Yaw*: todas as conexões entre os módulos do robô são do tipo *yaw*, o movimento ocorre em duas dimensões; e
- *Pitch-Yaw*: as conexões entre os módulos são alternadas entre *pitch* e *yaw*, o robô se movimenta em 3 dimensões.

Para o modelo que se deseja implementar será utilizada apenas a configuração *yaw-yaw*, de forma que se possa entender melhor a influência do atrito nesse tipo de movimento. Os módulos a serem desenvolvidos também podem ser adaptados para, em trabalhos futuros, serem conectados tanto em *pitch* quanto *yaw*.

3.3 Curva de Movimentação

Ao tentar descrever a movimentação das serpentes e reproduzi-la artificialmente, Hirose definiu, em 1976, a curva serpenoide (HIROSE; YAMADA, 2009). A curva serpenoide descreve a angulação de cada junta em relação ao eixo ao longo do corpo do robô. A curva serpenoide é, até hoje, amplamente utilizada para descrever a movimentação de robôs ápodes.

Figura 17 – Tipos de conexão em robôs ápodes:
 (a) *Pitch-Pitch* (b) *Yaw-Yaw* (c) *Pitch-Yaw*



Fonte: <http://www.learobotics.com/personal/juan/publicaciones/art14/html/node2.html>

O ângulo de referência α_s , que define a curva serpenoide, descreve a inclinação da reta tangente à curva em um ponto S :

$$\alpha_s = \alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}S\right), \quad (3.1)$$

onde k é o número de ondulações, l é o comprimento total da curva, α é o ângulo inicial da curva e S é um ponto do corpo do robô.

Define-se então os pontos em coordenadas cartesianas da curva de forma que as posições $x(S)$ e $y(S)$ são definidas como:

$$x(S) = \int_0^S \cos(\alpha_s) dS \quad e \quad (3.2)$$

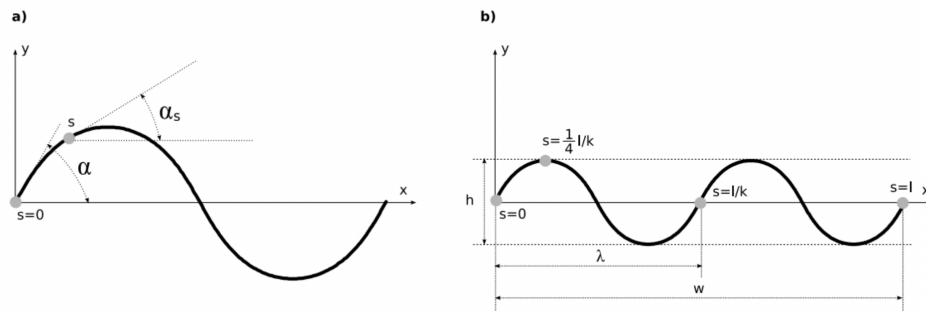
$$y(S) = \int_0^S \text{sen}(\alpha_s) dS. \quad (3.3)$$

Representando graficamente as coordenadas, com s variando de 0 a l , a curva mostra a forma e posição do corpo do robô no caso contínuo, ou seja, caso o corpo do robô fosse completamente elástico (Figura 18).

3.3.1 Discretização

Como mostrado em (QIAO et al., 2017), os robôs ápodes apresentam apenas um número finito de M segmentos, que definem a posição de cada uma das juntas na cobra. As

Figura 18 – Curva Serpenoide Contínua: a) Definição do ângulo α_s
b) Comprimento l do corpo da cobra



Fonte: (EREKO, 2015)

equações [Equação 3.2](#) e [Equação 3.3](#) podem ser adaptadas de maneira a informar a posição no espaço da M -ésima junta, de acordo com

$$x_i = \sum_{k=1}^i \frac{1}{M} \cos \left(a \cdot \cos \left(\frac{kb}{M} \right) + \left(\frac{kc}{M} \right) \right) \quad e \quad (3.4)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^i \frac{1}{M} \text{sen} \left(a \cdot \cos \left(\frac{kb}{M} \right) + \left(\frac{kc}{M} \right) \right), \quad (3.5)$$

onde os parâmetros utilizados são descritos na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Parâmetros da curva

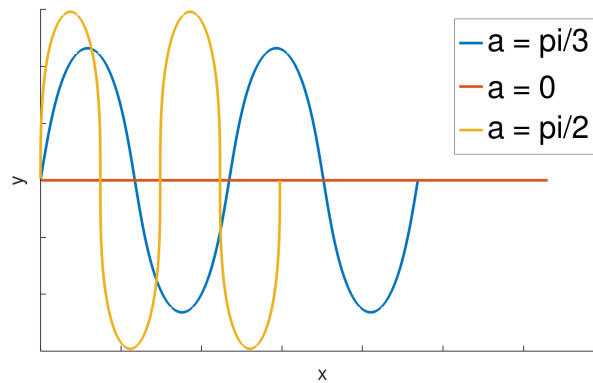
Parâmetros	Descrição
a	Ângulo de enrolamento
b	Número de Períodos ao longo do corpo
c	Direção do movimento do robô
i	i -ésima junta do robô
M	Número total de juntas no robô

3.3.2 Influência dos Parâmetros

Os parâmetros ‘a’, ‘b’ e ‘c’ influenciam a forma da curva serpenoide de maneiras diferentes. O parâmetro ‘a’ influencia no enrolamento da curva, ou seja, altera a distância entre os módulos da cabeça e da cauda da forma mostrada na [Figura 19](#). É importante observar que o parâmetro ‘a’ deve variar entre 0° e 120° , para evitar colisão entre os módulos ([Figura 20](#)).

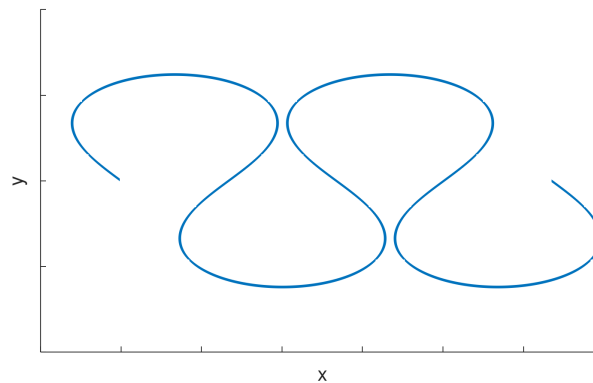
O parâmetro ‘b’ influencia na quantidade de períodos ao longo do corpo do robô como mostrado na [Figura 21](#). O parâmetro ‘c’ influencia na direção da curva, alterando o eixo de simetria, como mostrado na [Figura 22](#).

Figura 19 – Influência do parâmetro ‘a’ na forma da curva



Fonte: De autoria própria.

Figura 20 – Valor máximo para o parâmetro ‘a’ = $\frac{2\pi}{3}$



Fonte: De autoria própria.

3.3.3 Definição dos Ângulos

Foi proposto por Gonzales em (GÓMEZ, 2008) uma equação para, dado uma junta i em um dado momento, determinar seu ângulo de inclinação na curva discreta:

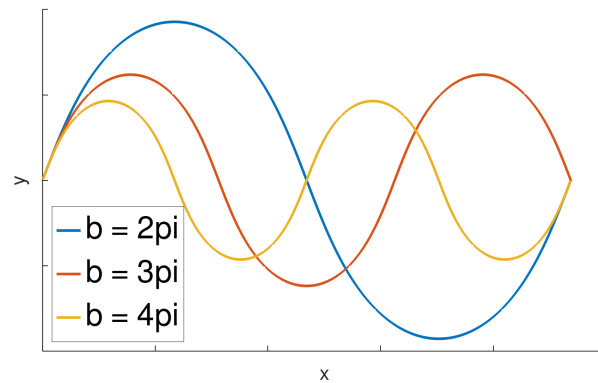
$$\phi_i(t) = -2 \cdot a \cdot \text{sen}\left(\frac{b}{2 \cdot M}\right) \cdot \text{sen}\left(\omega t + \left(\frac{b}{M}\right) \cdot \left[(i-1) + \frac{d_0}{d}\right]\right) - \frac{c}{M}, \quad (3.6)$$

onde d_0 representa o braço direito do módulo, ou seja, a distância entre o início do módulo e o atuador, enquanto d representa o comprimento do módulo (ilustrado na Figura 23). Como o módulo proposto apresenta o atuador na conexão com o módulo seguinte, d_0 será igual a d . Sendo assim, pode-se reescrever a Equação 3.6 como:

$$\phi_i(t) = -2 \cdot a \cdot \text{sen}\left(\frac{b}{2 \cdot M}\right) \cdot \text{sen}\left(\omega t + \left(\frac{i \cdot b}{M}\right)\right) - \frac{c}{M}. \quad (3.7)$$

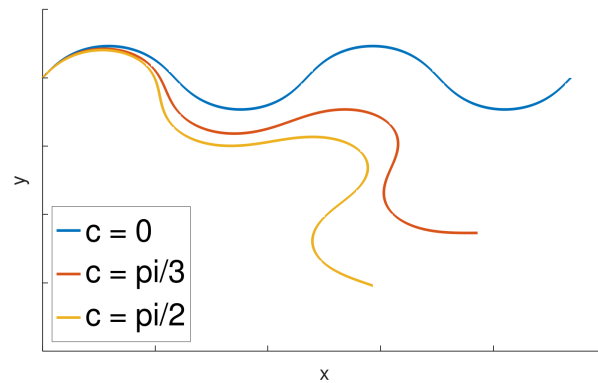
A partir da Equação 3.7 foi possível implementar um código utilizando a linguagem

Figura 21 – Influência do parâmetro 'b' na forma da curva



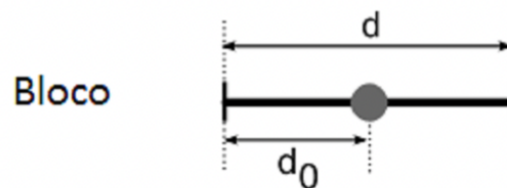
Fonte: De autoria própria.

Figura 22 – Influência do parâmetro 'c' na forma da curva



Fonte: De autoria própria.

Figura 23 – Representação do posicionamento da junta



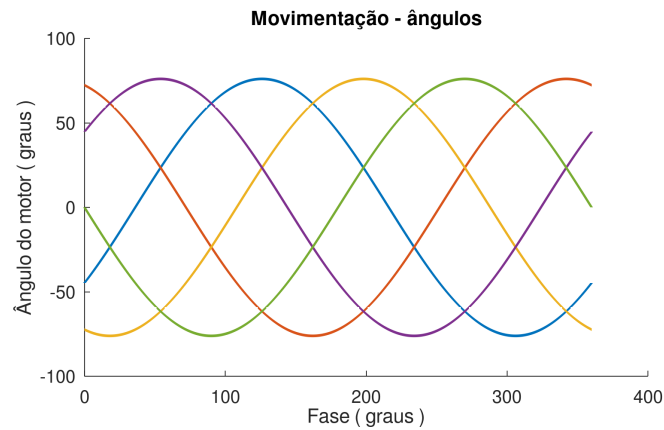
Fonte: (EREKO, 2015)

GNU Octave¹. O GNU Octave é um software de código aberto que oferece um ambiente de programação e computação numérica, usado para realizar cálculos matemáticos e análise de dados. O código calcula, variando wt de 0 a 2π , os ângulos que devem ser atuados em cada uma das juntas a fim de que o robô produza movimento para se adequar à curva serpenoide.

¹ Todos os códigos citados podem ser encontrados no repositório do Github: <https://github.com/vinicius-cgomes/TG-snake-robot>

A [Figura 24](#) mostra um conjunto de curvas, onde cada curva representa a sequência de ângulos que deve ser realizada por cada atuador do robô de forma sincronizada.

Figura 24 – Definição dos ângulos a serem atuados por um robô com 5 módulos

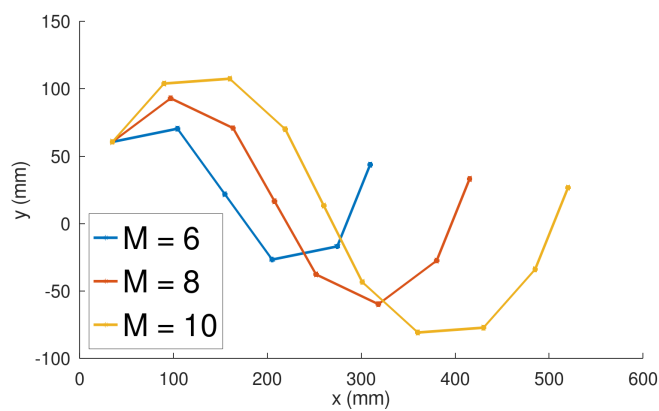


Fonte: De autoria própria.

3.3.4 Posicionamento das Juntas

Por meio dos ângulos de cada junta que compõem o robô, pode-se encontrar também a posição de cada junta no plano por meio das suas coordenadas x e y . O código escrito em Octave mostra a posição de cada junta em determinado instante de tempo. É importante notar que quanto maior o número de módulos mais a curva se aproxima da curva serpenoide contínua, como observado na [Figura 25](#).

Figura 25 – Diferença da curva formada pelo robô para diferentes quantidades de módulos: $M=6$, $M=8$ e $M=10$



Fonte: De autoria própria.

4 Projeto do Módulo

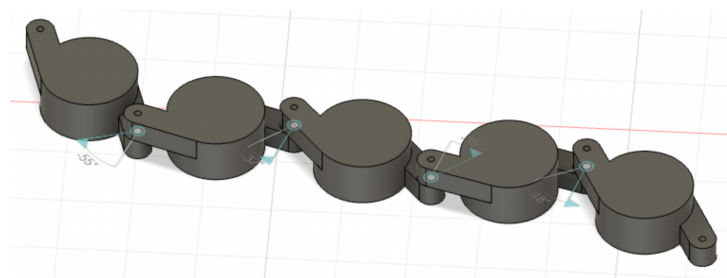
Se baseando nos trabalhos expostos no [Capítulo 2](#) e principalmente nos trabalhos do grupo Ereko, foi proposto um novo modelo de módulo para que os principais aspectos da movimentação ápole serpentina possam ser estudados.

4.1 Princípios

Pensando nos aprendizados obtidos com as implementações anteriores e no objetivo principal de testar a movimentação em yaw-yaw, foram propostos os seguintes princípios para a construção do módulo VDM-Y:

- Os módulos devem permitir a conexão por meio do eixo do motor presente, podendo-se alterar o número de módulos presentes no robô, como mostrado na [Figura 26](#);
- A área inferior deve permitir o acoplamento da placa de atrito;
- O módulo deve ser capaz de gerar um torque suficiente para que seja possível arrastar os módulos (movimentação *yaw*); e
- O módulo deve conseguir realizar movimentação *yaw-yaw* da forma mais simples possível, minimizando o número de componentes necessários.

Figura 26 – Robô montado com módulos VDM-Y



Fonte: De autoria própria.

4.2 Controlador

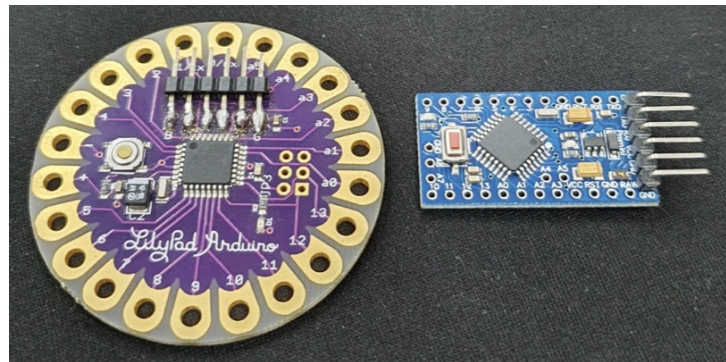
Inicialmente, o controlador escolhido para ser utilizado foi o LilyPad Arduino. O microcontrolador utiliza um processador ATmega328 e é comumente utilizado para vestimentas e tecidos inteligentes, pela sua forma e facilidade de sua utilização com linhas

condutoras. A escolha do LilyPad foi feita pela semelhança de sua geometria com a placa de atrito, tendo uma maior facilidade de se encaixar no módulo.

Contudo, após realizados testes com o LilyPad, foi observado que seu objetivo funcional era diferente da aplicação desejada e apresentava algumas dificuldades práticas para a implementação. A principal dificuldade encontrada foi na conexão para controle do servo motor.

Pensando nos pontos destacados acima, é proposto alterar o modelo do microcontrolador. Optou-se por utilizar o Arduino Pro Mini. Este também utiliza um processador ATmega328, mas apresenta maior facilidade e menos fragilidade para a soldagem de pinos, o que torna mais fácil a aplicação desejada e a realização de testes. Os dois controladores citados podem ser observados na [Figura 27](#).

Figura 27 – LilyPad Arduino (Esquerda) e Arduino Pro Mini (Direta)



Fonte: Imagem capturada pelo autor.

O principal uso dos controladores será salvar a tabela de ângulos descrita na [subseção 3.3.3](#) e atuar os motores de cada módulo de acordo com a tabela. Também será utilizado para receber as informações de comunicação entre os módulos.

4.3 Primeiro Modelo

Esta seção descreve modificações feitas no modelo inicial, na [Figura 26](#), para que os objetivos propostos fossem atingidos.

O primeiro ponto pensado para o projeto do módulo foi o motor. O motor escolhido foi o servo Htec HS-85MG. O modelo apresenta faixa de torque máximo de 3.0 a 3.5 kg.cm e um peso de 21.9 gramas.

Em seguida foi alterado o modelo da estrutura do módulo. Um dos objetivos era ter um módulo de fácil manuseio e montagem. Sendo assim, foi projetada uma tampa de encaixe com pinos assim como uma maneira de permitir que o módulo seja aberto nas laterais, para que a passagem de cabos e o manuseio dos componentes e conexões interiores

seja facilitada. Primeiramente foi produzido um modelo em papelão, mostrado na [Figura 28](#), para que sejam verificadas as dimensões e a viabilidade da proposta.

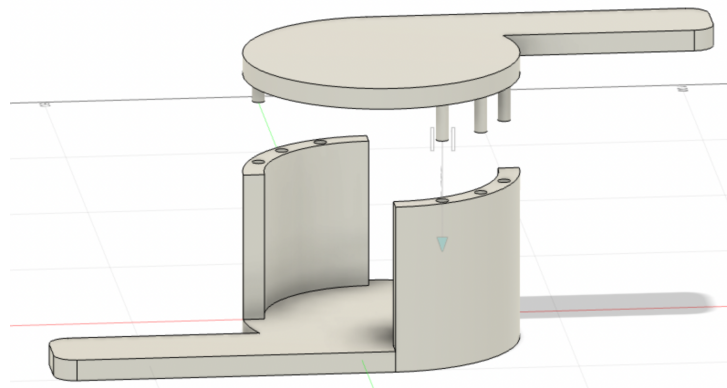
Figura 28 – Modelo produzido em papelão



Fonte: Imagem capturada pelo autor.

Em seguida, o modelo foi construído no *software* Fusion da AutoDesk. O *software* fusion permite que seja atribuído um material ao modelo, obtendo-se assim uma estimativa de sua massa. Foi atribuído ao modelo o material plástico ABS e a massa estimada pelo *software* foi de 45.763g para o corpo e 30.117g para a tampa.

Figura 29 – Modelo criado no *software* Fusion



Fonte: De autoria própria.

4.3.1 Análise do Torque

É necessário realizar, após o modelo pronto, uma análise de viabilidade do módulo projetado. Para analisar esta viabilidade, deseja-se verificar qual torque máximo será exigido do motor para a movimentação e se o motor é capaz de entregar o torque necessário.

Para esta análise vamos considerar a análise proposta por (SOUSA, 2014), em que o centro de massa é localizado no centro do módulo. Considera-se que o torque máximo necessário é o torque para mover dois módulos. A força de atrito é dada por:

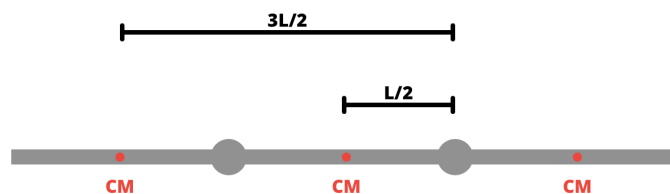
$$F_a = mg\mu, \quad (4.1)$$

onde m é a massa do módulo, g é a aceleração da gravidade e μ é o coeficiente de atrito entre o módulo e o solo. Logo, o torque máximo será dado pela equação:

$$T = mg\mu(L/2) + mg\mu(3L/2) = 2mg\mu, \quad (4.2)$$

onde o primeiro termo representa a distância do ponto de atuação do motor para o centro de gravidade do primeiro módulo e o segundo termo para o segundo módulo, com L representando o comprimento do módulo (Figura 30).

Figura 30 – Análise do torque necessário para levantar dois módulos



Fonte: De autoria própria.

Considerando o coeficiente de atrito máximo possível igual a 1, para que haja uma margem de funcionamento do módulo em diferentes cenários, e a Tabela 2 de massas, pode-se calcular a massa máxima que o motor escolhido é capaz de suportar e compará-lo com a massa total do módulo.

Tabela 2 – Massas do primeiro módulo

Componente	Massa
Motor	21.9g
Arduino	3.0g
Tampa	30.1g
Corpo	45.8g
Total	100.8g

Sendo o torque máximo do motor $3.5\text{kg}\cdot\text{cm}$ e o comprimento L de braço do módulo 160mm , pode-se encontrar o resultado:

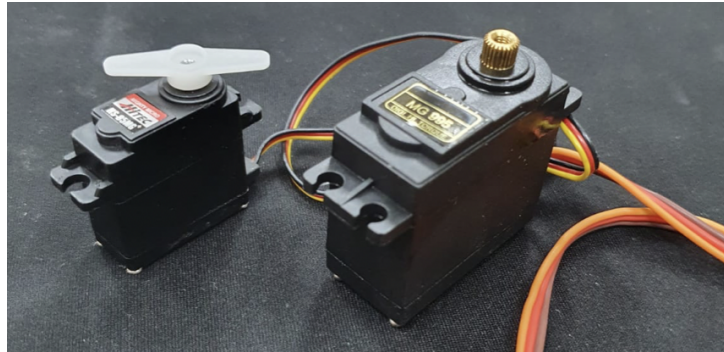
$$3.5\text{kg}\cdot\text{cm} = 0.3432\text{N}\cdot\text{m} = 2 \cdot 9.82 \cdot 0,16 \cdot m \Leftrightarrow m = 109.2\text{g}. \quad (4.3)$$

Considerando que outros elementos ainda serão adicionados ao módulo, incluindo cabos de conexão e a placa de atrito, não foi considerada adequada a diferença entre a massa estimada do módulo e a massa máxima suportada pelo motor. Desta forma, deve-se refazer o projeto alterando dois fatores principais: o torque máximo que o motor é capaz de fornecer e o braço do módulo.

4.4 Segundo Modelo

Pensando em aumentar o torque máximo fornecido, foi escolhido o servo motor MG995. O modelo pode fornecer um torque máximo de 9.4 kg.cm e apresenta uma massa de 69g.

Figura 31 – Servo motor HS-85MG (esquerda) e MG995 (direita)



Fonte: Imagem capturada pelo autor.

Para que fosse diminuído o braço do torque, tornou-se necessário refazer o modelo de forma que o motor encaixasse parcialmente dentro do módulo. O encaixe da tampa do módulo também foi alterado, trocando os pinos por abas para tornar o encaixe mais resistente. Foi também adicionado um suporte para o motor. Pelo *software*, foi estimado uma massa de 53.051g para o corpo e 23.768g para a tampa do módulo.

4.4.1 Análise do Torque

Foi realizada a análise do torque para o novo modelo proposto seguindo a mesma [Equação 4.3](#) e a nova [Tabela 3](#) de massas. Tendo o novo braço L do módulo de 100mm, pode se chegar ao resultado:

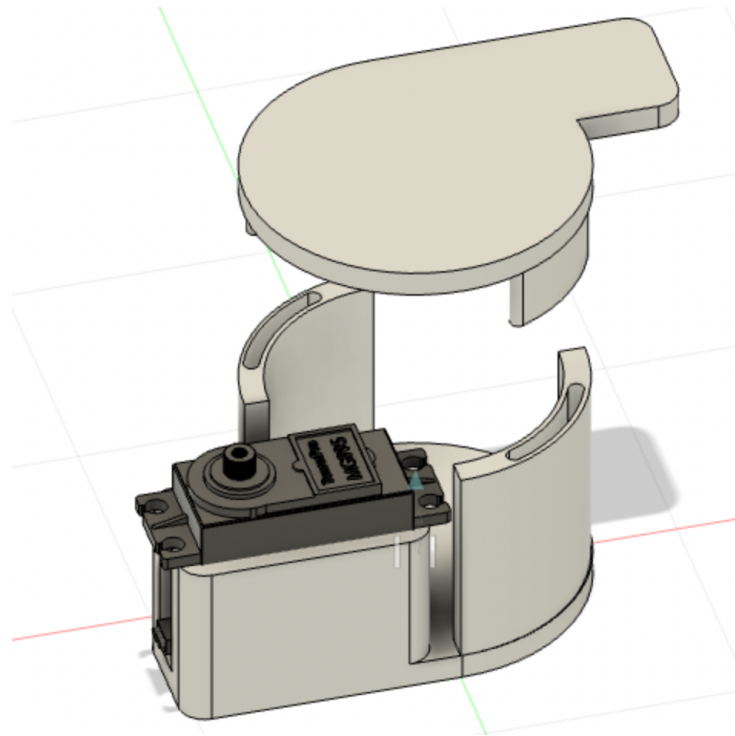
$$9.4\text{Kg.cm} = 0.9218\text{N.m} = 2 \cdot 9.82 \cdot 0.10 \cdot m \Leftrightarrow m = 469.3\text{g}. \quad (4.4)$$

Tabela 3 – Massas do segundo módulo

Componente	Massa
Motor	69.0g
Arduino	3.0g
Tampa	23.8g
Corpo	53.1g
Total	148.9g

Como o resultado para a maior massa suportada pelo motor é bem mais alto que a massa estimada, pode-se concluir que o modelo se encaixa nos objetivos propostos e é viável.

Figura 32 – Novo modelo criado no *software* Fusion

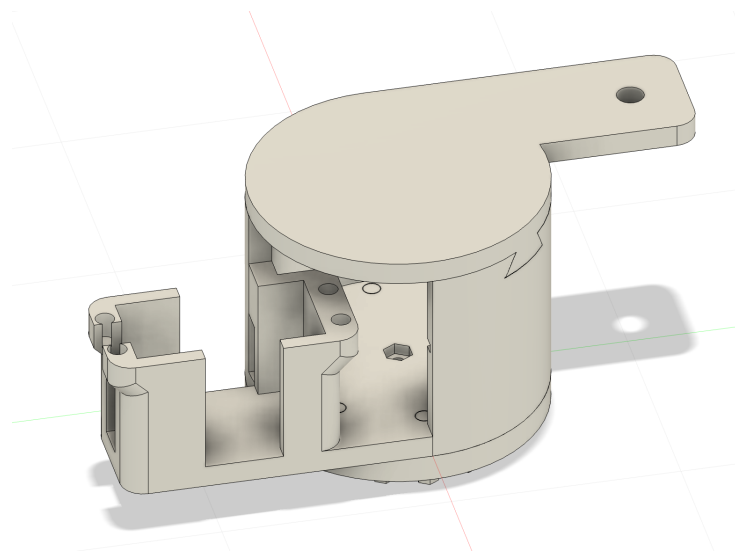


Fonte: De autoria própria.

4.5 Terceiro Modelo

No trabalho (ROCHA, 2023) foram propostas mudanças estruturais no módulo para que fosse possível realizar o encaixe da placa de atrito, assim como otimizar os encaixes do motor e da tampa. O módulo com as alterações propostas é mostrado na [Figura 33](#).

Figura 33 – Novo módulo com encaixe para placa de atrito



Fonte: De autoria própria.

4.5.1 Análise do Torque

Como o motor a ser utilizado não foi alterado, a massa máxima suportada continua a mesma da análise realizada anteriormente. Resta analisar a massa total do novo módulo.

Tabela 4 – Massas do terceiro módulo

Componente	Massa
Motor	69.0g
Arduino	3.0g
Tampa	24.1g
Corpo	52.4g
Placa de Atrito	24.0g
Total	172.5g

A massa total do módulo, exposta na [Tabela 4](#), ainda está abaixo do suportado pelo motor. Assim, conclui-se que o módulo é viável.

5 Validação do Modelo em Ambiente de Simulação

Existem diversos fatores que influenciam na movimentação ápole, entre eles a escolha dos diferentes parâmetros da curva de Hirose (GÓMEZ, 2008) e o grau de anisotropia no atrito (HU et al., 2008). Para verificar o comportamento do robô projetado frente às diferentes características que influenciam em seu deslocamento, foram realizados testes dentro de ambientes de simulação. Além disso, com ajuda dos *softwares* de simulação é possível verificar o comportamento do robô quando as placas de atrito propostas por (GALEMBECK, 2018) são utilizadas para gerar anisotropia. Os testes e verificações realizados são apresentados nesta seção. Para que os testes sejam realizados serão feitas algumas simplificações. O único componente considerado interior ao módulo é o servo motor MG995, não são considerados fios, controladores e baterias. Também não são consideradas interferências no movimento além do atrito.

5.1 Descrição do modelo em URDF

Para que um modelo 3D possa ser simulado, comumente se utiliza o formato de descrição URDF (*Unified Robotics Description Format*). O URDF é um arquivo do tipo XML que inclui a descrição física de um robô. As estruturas básicas utilizadas são *links* e *joints*, onde cada *link* representa uma estrutura que faz parte do robô e a *joint* irá descrever como cada *link* é ligado ao restante do robô. A estrutura usada na descrição do arquivo URDF é em árvore, ou seja, existe sempre um *link* raiz dentro do qual todos os outros *links* estão aninhados por meio de *joints*.

O arquivo URDF utilizado foi criado por meio da extensão “SW2URDF”. Esta extensão permite exportar um modelo criado no *software* “Solidworks” para um arquivo em formato URDF. O robô foi descrito com 10 módulos de forma que cada módulo tenha um módulo pai e um módulo filho, aos quais está ligado por juntas de revolução. A descrição do robô em URDF pode ser encontrada no repositório do Github¹.

5.2 CoppeliaSim

CoppeliaSim é um ambiente de simulação de robótica que apresenta uma interface simples e intuitiva. O *software* permite importação de arquivos URDF diretamente para o

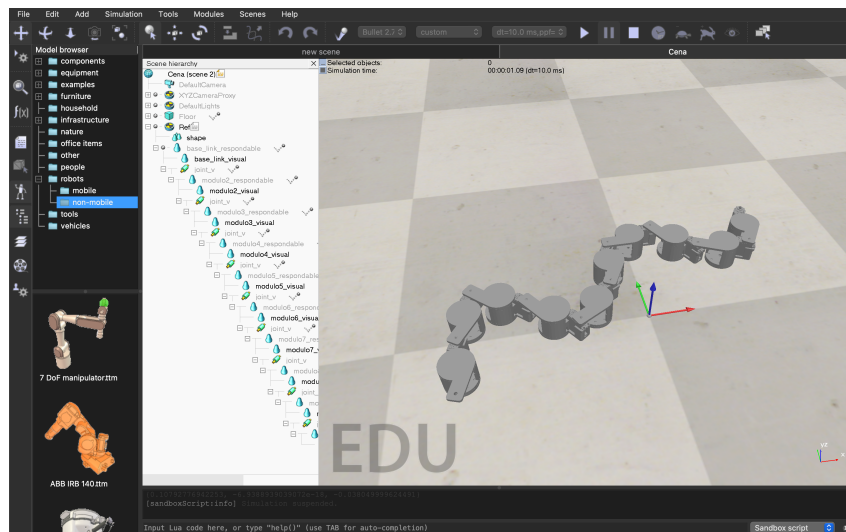
¹ Todos os códigos citados podem ser encontrados no repositório do Github:
<https://github.com/vinicius-cgomes/TG-snake-robot>

ambiente de simulação e permite alterar as propriedades dos objetos por meio de interface gráfica. Também é possível utilizar diferentes motores de física (*physics engine*) para realizar a simulação, como por exemplo as físicas Bullet, ODE e MuJoCo. Motores de física são bibliotecas usados para simular e calcular o comportamento físico de objetos em ambientes virtuais. Eles são usados para aplicar as leis da física, como gravidade, colisões, fricção e dinâmica de corpos rígidos, a fim de criar interações realistas entre objetos virtuais.

Após adicionar o modelo do robô no ambiente de simulação CoppeliaSim, é possível controlar a posição de cada uma das juntas adicionando ao corpo um *script* em LUA. O *script* desenvolvido percorre a tabela de ângulos gerada em Octave na [subseção 3.3.2](#) e atua em cada uma das juntas do robô para que ele se posicione na curva de Hirose.

A física Bullet, utilizada na simulação, processa o atrito entre duas superfícies multiplicando os dois coeficientes um pelo outro. O ambiente de simulação CoppeliaSim não permite simular o atrito anisotrópico.

Figura 34 – Ambiente de simulação CoppeliaSim



Fonte: CoppeliaSim

O robô foi simulado se movimentando de acordo com a curva de Hirose com diferentes parâmetros. Contudo, como para todos os casos o atrito era isotrópico, o robô não sofreu deslocamento em nenhuma direção, apenas rotacionou em seu próprio eixo. Sendo assim, foi observado que somente alterando os parâmetros da curva, não foi possível obter deslocamento sendo o atrito isotrópico. Como o atrito anisotrópico é aspecto fundamental para a movimentação, outro simulador que permita essa funcionalidade deve ser utilizado para analisar o movimento.

5.3 Gazebo

O Gazebo é um simulador de código aberto que também permite usar diversos motores de física. Contudo, o ambiente de simulação do Gazebo permite mais funcionalidades, inclusive a descrição de atrito anisotrópico. Por esse motivo, o Gazebo foi escolhido para realizar os testes deste trabalho.

O motor de física utilizado no Gazebo é o ODE (*Open Dynamics Engine*). A forma como o ODE processa o atrito entre duas superfícies é utilizando sempre o menor coeficiente entre os dois objetos que colidem.

5.3.1 Alterações no código URDF

Para que um robô descrito em URDF possa ser simulado no ambiente de simulação gazebo é necessário realizar algumas alterações no código de descrição.

Primeiramente é necessário adicionar os elementos que permitirão realizar o controle do robô dentro do simulador, adicionando o *plugin gazebo_ros_control*. Além disso, a cada junta é necessário adicionar um elemento `transmission`, com a interface `EffortJointInterface`, que permitirá aplicar torque nas juntas para realizar o movimento.

Para descrever o atrito anisotrópico, deve-se adicionar um elemento `<gazebo>` com 3 parâmetros. O primeiro parâmetro (μ_1) é um parâmetro numérico que descreve o coeficiente de atrito na direção 1. O segundo parâmetro (μ_2) é um parâmetro numérico que descreve o coeficiente de atrito na direção 2. O terceiro parâmetro (`fdir1`) é um vetor de 3 elementos que descreve a direção do coeficiente de atrito μ_1 , sendo a direção do coeficiente de atrito μ_2 perpendicular à direção `fdir1` e à força normal aplicada ao corpo. O parâmetro `fdir1` é sempre declarado como `[1 0 0]`, enquanto μ_1 e μ_2 podem mudar de acordo com o teste que se deseja realizar. O coeficiente μ_1 irá descrever o atrito nos sentidos positivo e negativo do módulo, enquanto o coeficiente μ_2 irá descrever o atrito no sentido lateral ([Figura 12](#))

5.3.2 Controle

Para realizar o controle do robô dentro do simulador, é necessário que seja descrito qual tipo de controle deve ser usado e que os controladores declarados sejam executados no ROS (*Robot Operating System*) utilizando o comando `roslaunch`.

O primeiro passo é criar um arquivo YAML, onde devem ser descritos todos os controladores que estarão presentes na simulação. Cada descrição deve conter 4 elementos: o nome do controlador, o tipo de controlador, a junta sobre a qual o controlador irá atuar e os parâmetros PID do controlador. Todos os controladores utilizarão o tipo

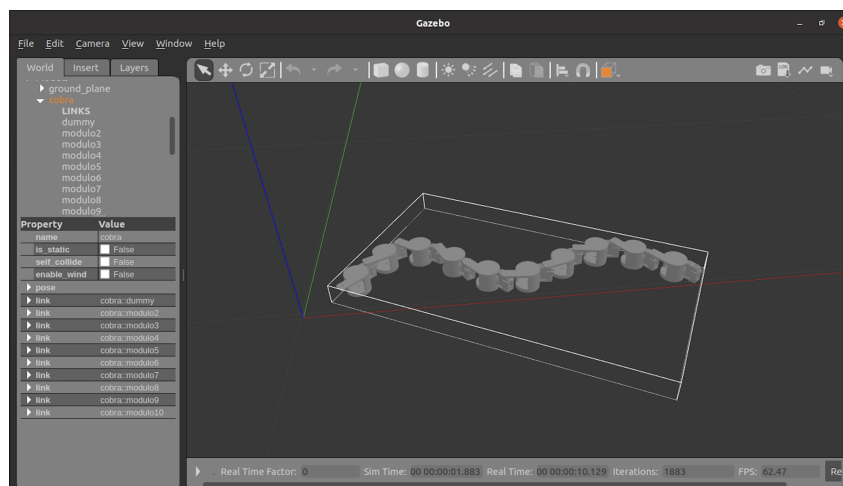
`JointPositionController`, que permite atuar as juntas nos ângulos desejados em radianos.

Para escolher os parâmetros do controlador utilizado foi considerado o tempo de resposta e o *overshoot* desejados. Por sua simplicidade e tempo de resposta mais rápido foi escolhido um controlador proporcional. O parâmetro proporcional deve ser grande o suficiente para fornecer um tempo de resposta rápido, mas não tão alto que o *overshoot* afete o movimento do robô. Após testes com diferentes valores os parâmetros PID escolhidos foram p: 0.1, i: 0.0, d: 0.0.

Com os controladores declarados, é necessário criar um arquivo do tipo *launch*. Neste arquivo estão descritos o caminho do robô a ser controlado e o caminho do arquivo YAML que contém a descrição dos controladores. Em seguida são listados todos os controladores a serem executados. Após executar o arquivo com o comando `roslaunch`, será possível acessar os controladores criados.

Um programa em Python pode ser criado para acionar os controladores de forma automática. O programa criado percorre a tabela de ângulos gerada na [subseção 3.3.2](#) e aciona cada uma das juntas de acordo com a curva de Hirose. É possível realizar a comunicação entre o programa em Python e o ambiente de simulação Gazebo a partir da biblioteca `rospy` e do comando `rospy.Publisher('/namespace/controller_name/command', Float64, queue_size=10).publish(valor_radianos)`.

Figura 35 – Ambiente de simulação Gazebo



Fonte: Gazebo

5.4 Testes

Uma vez que as modificações foram feitas e que se consiga controlar o robô dentro do ambiente de simulação, pode-se realizar os testes desejados. Todos os testes são realizados observando a posição do módulo da “cabeça” do robô, ou seja, o módulo 0.

5.4.1 Influência dos parâmetros da curva de Hirose no deslocamento

O objetivo inicial é entender como os diferentes parâmetros da curva de Hirose afetam o deslocamento do robô. Para realizar os testes, foi considerado um cenário ideal de atrito anisotrópico, ou seja, o atrito na direção do movimento (paralelo ao corpo do robô) é muito baixo e o atrito lateral (perpendicular ao corpo do robô) é muito alto. Nos primeiros testes, realizados com diferentes valores aleatórios para os parâmetros da curva, foi observado que além do deslocamento linear, ou seja, paralelo ao corpo do robô, sempre estava presente um deslocamento lateral, ou seja, perpendicular ao corpo do robô. Foi proposto que esse deslocamento estava presente devido à assimetria do módulo, gerando no movimento uma força resultante que favorece a rotação do robô.

5.4.1.1 Compensação do deslocamento lateral utilizando o parâmetro 'c'

Na curva de Hirose, o parâmetro 'c' é utilizado para rotacionar o eixo da curva alterando sua direção. Foi proposto que, utilizando o parâmetro 'c', seria possível compensar o deslocamento lateral observado no movimento do robô.

Para que a hipótese fosse testada, foram realizadas simulações com diferentes valores para os parâmetros mostrados na [subseção 3.3.2](#). O teste consiste em, mantendo todos os outros parâmetros constantes, variar o parâmetro 'c' e observar a influência deste no deslocamento lateral. Os parâmetros 'a' e 'b' foram escolhidos de forma arbitrária dentro da faixa de valores possíveis:

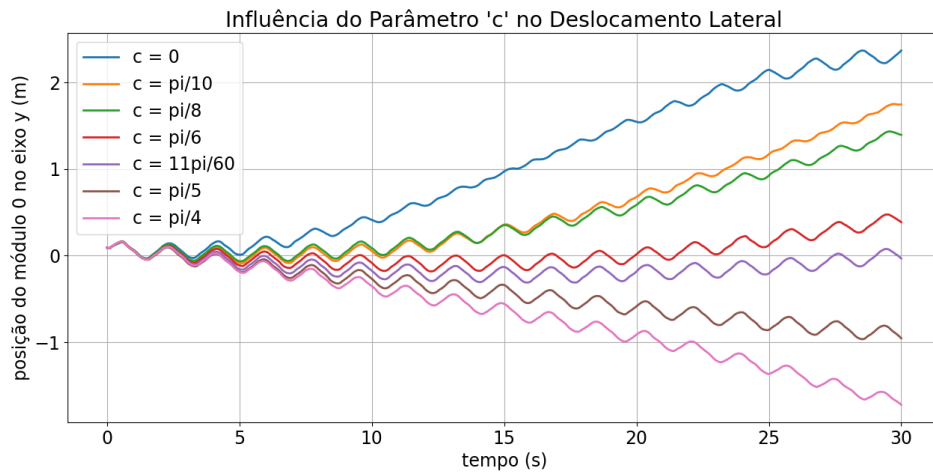
- $a = \frac{2\pi}{5}$;
- $b = 4\pi$;
- $\mu_1 = 0.0$;
- $\mu_2 = 0.9$; e
- $f_{dir1} = [100]$.

Dos resultados dos testes mostrados na [Figura 36](#) observa-se que, apesar de ser possível controlar a direção do movimento utilizando o parâmetro 'c', não é possível escolher um parâmetro 'c' fixo que elimine completamente o deslocamento lateral.

5.4.1.2 Influência do parâmetro 'c' no deslocamento linear

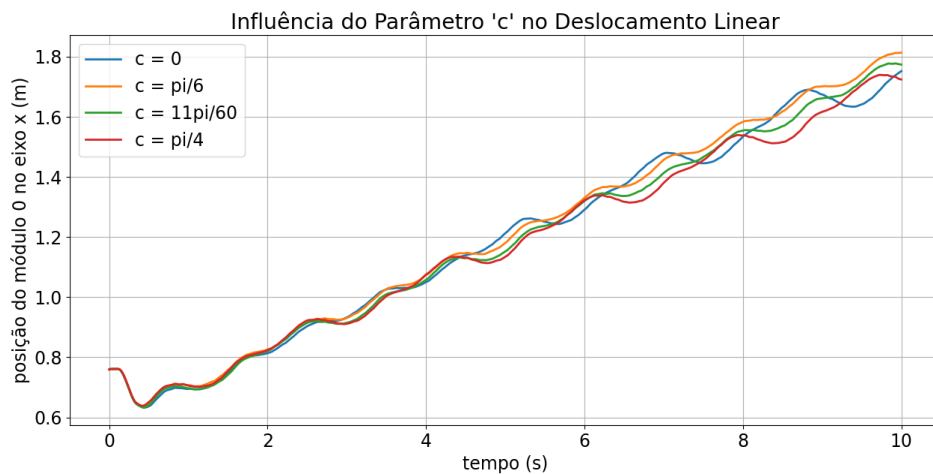
Uma vez que se demonstrou que é possível utilizar o parâmetro 'c' para obter um deslocamento lateral com o robô, é necessário observar se o parâmetro irá influenciar no deslocamento linear. Os mesmos parâmetros do teste anterior foram utilizados.

Figura 36 – Influência do parâmetro 'c' no deslocamento lateral



Fonte: De autoria própria.

Figura 37 – Influência do parâmetro 'c' no deslocamento linear



Fonte: De autoria própria.

Como observado na [Figura 37](#), o deslocamento linear é alterado somente quando o robô sofre rotação devido ao movimento lateral, ou seja, o deslocamento na direção paralela ao corpo não sofre alteração com a variação do parâmetro 'c'.

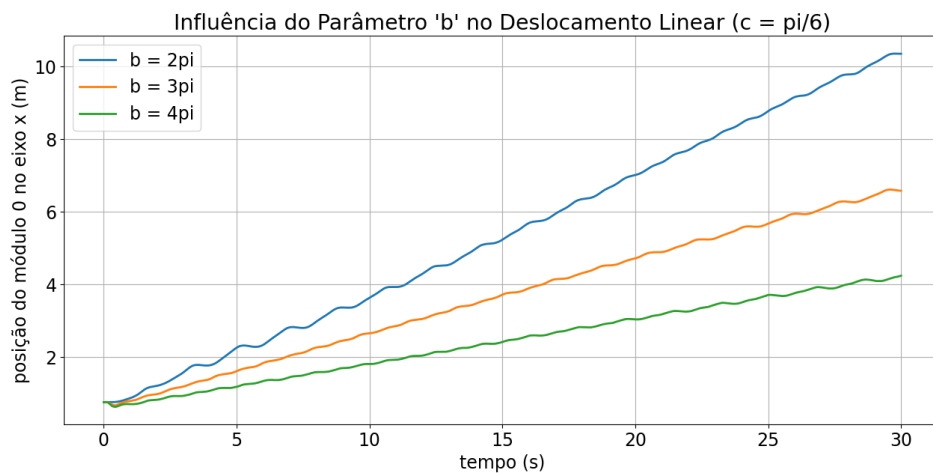
5.4.1.3 Influência do parâmetro 'b' no deslocamento linear

Na curva de Hirose, o parâmetro 'b' determina a quantidade de períodos ao longo do corpo do robô. É desejado analisar a influência da escolha do parâmetro 'b' no deslocamento linear do robô. Deste modo, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e variando somente o parâmetro 'b', seu comportamento é observado. Os parâmetros foram escolhidos a partir do resultado com menor deslocamento lateral observado no teste anterior:

- $a = \frac{2\pi}{5}$;

- $c = \frac{\pi}{6}$;
- $\mu_1 = 0.0$;
- $\mu_2 = 0.9$; e
- $f_{dir1} = [100]$.

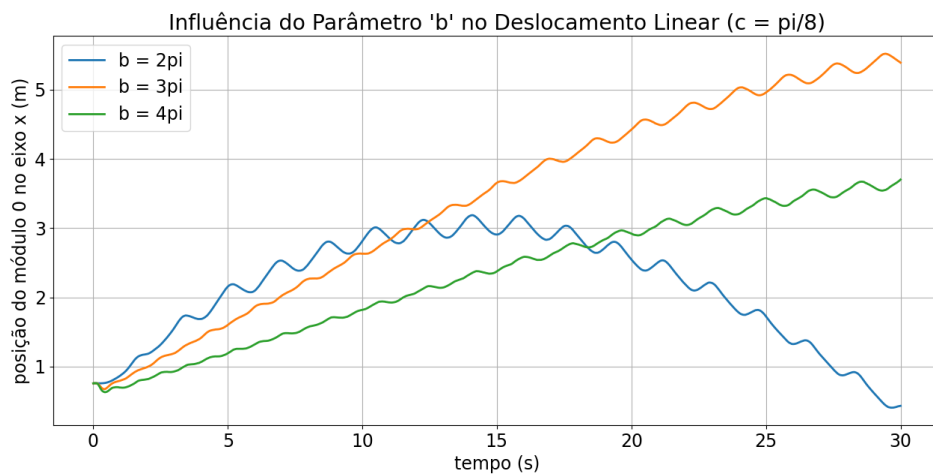
Figura 38 – Influência do parâmetro 'b' no deslocamento linear com $c = \frac{\pi}{6}$



Fonte: De autoria própria.

Dos resultados obtidos, é possível observar na [Figura 38](#) que, a princípio, o parâmetro 'b' é inversamente proporcional ao deslocamento. Contudo, pode-se repetir o mesmo teste alterando o valor de 'c'.

Figura 39 – Influência do parâmetro 'b' no deslocamento linear com $c = \frac{\pi}{8}$



Fonte: De autoria própria.

É possível observar na [Figura 39](#) que um maior valor para o parâmetro 'b' gera maior estabilidade no movimento, ou seja, um menor deslocamento lateral e menor rotação do

módulo durante o movimento. Já um menor valor de ‘b’, apesar de apresentar maior deslocamento linear a curto prazo, favorece a rotação do robô e altera o sentido do deslocamento mais rapidamente.

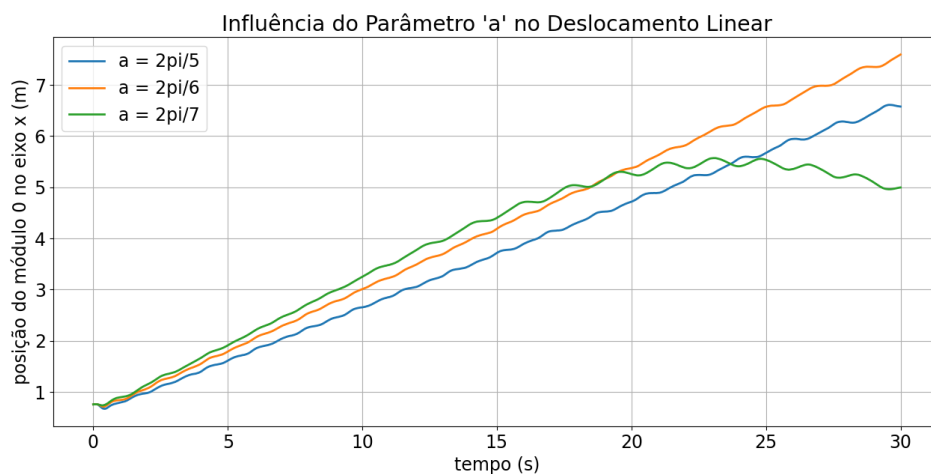
5.4.1.4 Influência do parâmetro ‘a’ no deslocamento linear

Na curva de Hirose, o parâmetro ‘a’ influencia no enrolamento da curva, ou seja, um ‘a’ maior representa curvas mais fechadas e ângulos de atuação maiores enquanto um ‘a’ menor representa curvas mais suaves e ângulos de atuação menores.

Para analisar a influência do parâmetro ‘a’ no movimento se mantém todos os outros parâmetros constantes enquanto ‘a’ é alterado. Os parâmetros foram escolhidos a partir do resultado com maior deslocamento linear observado no teste mostrado na [Figura 39](#):

- $b = 3\pi$;
- $c = \frac{\pi}{6}$;
- $\mu_1 = 0.0$;
- $\mu_2 = 0.9$; e
- $fdir1 = [100]$.

Figura 40 – Influência do parâmetro ‘a’ no deslocamento linear



Fonte: De autoria própria.

Na [Figura 40](#) é possível observar que do mesmo modo que o parâmetro ‘b’, o valor de ‘a’ é inversamente proporcional ao deslocamento linear. Contudo um valor pequeno de ‘a’ pode gerar instabilidade no movimento, ou seja, favorecer a rotação do módulo mais rapidamente.

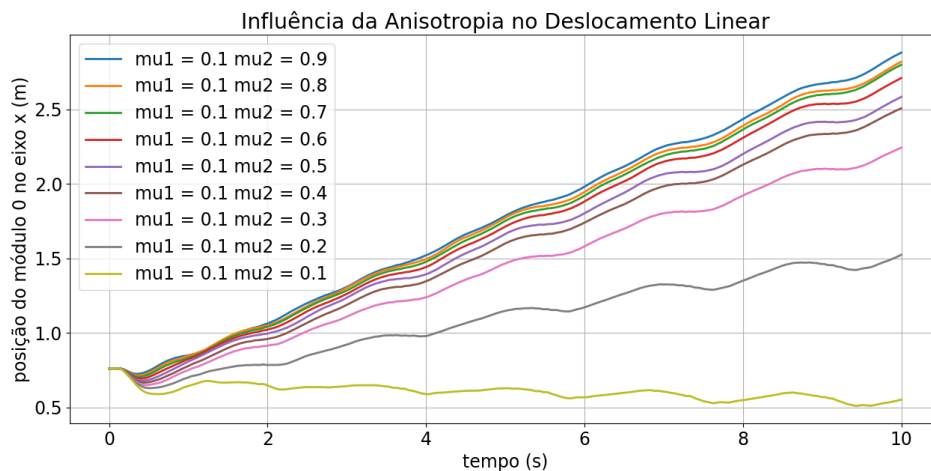
5.4.2 Influência da anisotropia no deslocamento linear

Sabe-se que para que ocorra movimento em um robô ápole é necessário que haja uma relação de anisotropia entre o atrito da direção lateral e da direção paralela ao movimento. Com esse teste deseja-se entender quais as relações de anisotropia entre os atritos μ_1 e μ_2 que permitem o movimento do robô. Para realizar os testes os parâmetros da curva foram fixados em

- $a = \frac{2\pi}{6}$;
- $b = 3\pi$;
- $c = \frac{\pi}{6}$; e
- $f_{dir1} = [100]$.

O primeiro teste realizado foi feito fixando o valor de μ_1 muito baixo. Em seguida, começando com um valor alto para μ_2 , diminuiu-se o atrito na direção lateral gradualmente.

Figura 41 – Influência da anisotropia no deslocamento linear para μ_1 constante e baixo



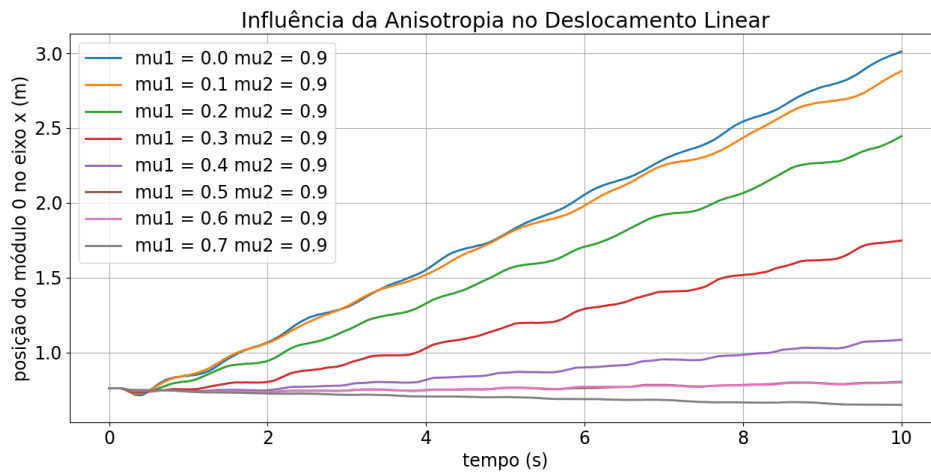
Fonte: De autoria própria.

Pode-se observar na [Figura 41](#) que mesmo para uma anisotropia baixa (diferença de 0.1 entre as direções) é possível obter deslocamento. O robô somente não consegue avançar no caso de atrito isotrópico, quando ambos os coeficientes μ_1 e μ_2 são iguais.

O segundo teste realizado foi feito fixando o valor de μ_2 alto. Em seguida, começando com um valor baixo para μ_1 , aumentou-se o atrito na direção do movimento gradualmente.

Na [Figura 42](#) pode-se observar que a cada passo de 0.1 no coeficiente de atrito μ_1 o movimento do robô cai de forma muito mais rápida se comparado com os resultados obtidos no teste anterior. Inclusive, pode-se notar que o robô não consegue se deslocar para

Figura 42 – Influência da anisotropia no deslocamento linear para μ_2 constante e alto



Fonte: De autoria própria.

frente com uma diferença de atrito de 0.4 entre as direções ($\mu_1 = 0.5$ e $\mu_2 = 0.9$), diferente dos resultados no teste anterior, que o robô ainda conseguia se movimentar com diferença de atrito de apenas 0.1 entre as direções ($\mu_1 = 0.1$ e $\mu_2 = 0.2$). Estes resultados mostram que apesar de uma alta anisotropia contribuir para o deslocamento do robô, outro fator importante é um baixo atrito na direção do movimento, sendo mais vantajoso uma baixa anisotropia com μ_1 baixo em detrimento de uma maior anisotropia com μ_1 alto.

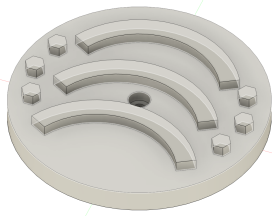
5.5 Teste da reprodução de anisotropia com placa de atrito

Nos trabalhos (GALEMBECK, 2018) e (ROCHA, 2023) foram propostas geometrias fixas que poderiam reproduzir o atrito anisotrópico no contato de cada módulo com a superfície.

Utilizando o simulador Gazebo é possível adicionar a geometria proposta aos módulos e definir um atrito isotrópico. Assim, pode-se observar o comportamento do robô e se de fato a geometria irá induzir anisotropia no atrito. Foram testadas 2 geometrias, mostradas na Figura 43 e na Figura 44.

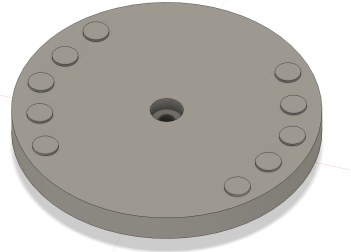
Para todos os testes, foram mantidos os parâmetros da curva de Hirose iguais aos parâmetros usados no teste apresentado na subseção 5.4.2. Sendo assim, é possível comparar os resultados obtidos nos dois testes e inferir os valores de anisotropia gerados pela geometria.

Figura 43 – Primeira geometria testada para induzir atrito anisotrópico, proposta por (GALEMBECK, 2018)



Fonte: De autoria própria.

Figura 44 – Segunda geometria testada para induzir atrito anisotrópico, proposta por (ROCHA, 2023)



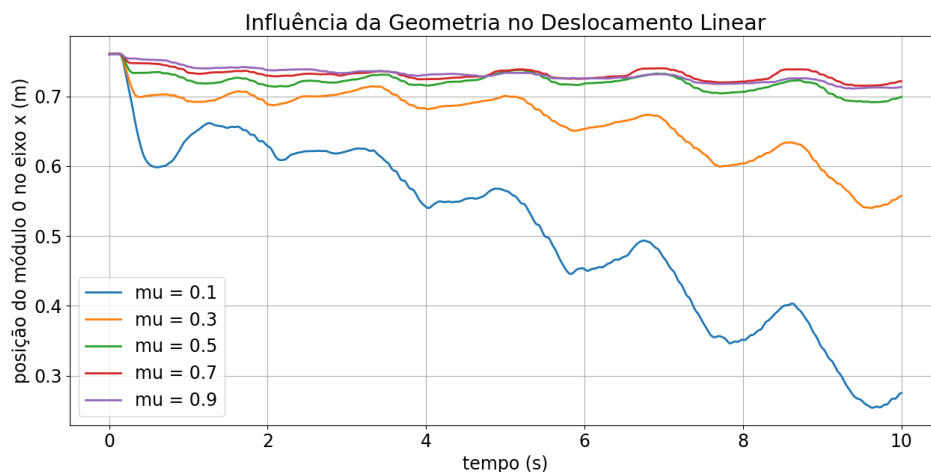
Fonte: De autoria própria.

5.5.1 Geometria Completa

O primeiro teste foi realizado com a geometria da [Figura 43](#), contendo todos os elementos propostos por (GALEMBECK, 2018).

No ambiente de simulação a geometria foi testada com diferentes coeficientes de atrito isotrópico, representando diferentes materiais. Todos os testes foram feitos por 10 segundos, seguindo o padrão dos testes realizados sem a placa de atrito. Os resultados obtidos estão expostos na [Figura 45](#).

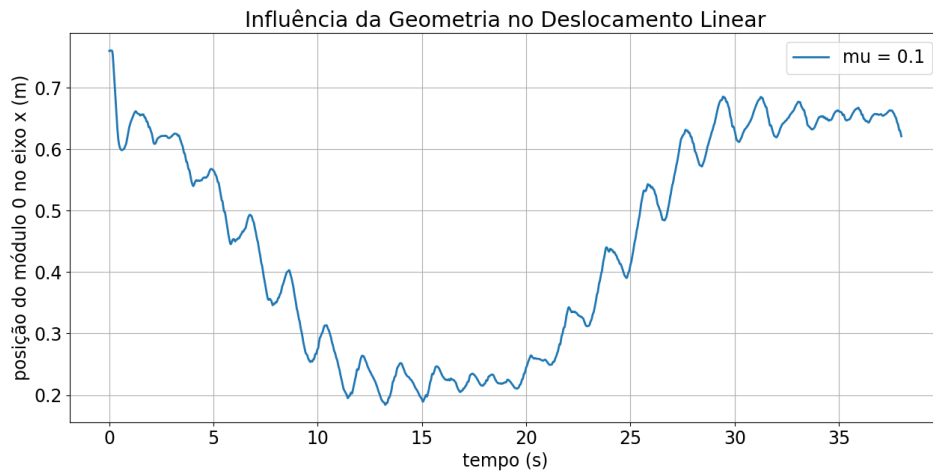
Figura 45 – Deslocamento linear observado do módulo com a primeira geometria proposta



Fonte: De autoria própria.

Em nenhum dos testes com a geometria completa foi possível observar deslocamento linear. Em todos os casos o robô rotaciona e retorna para a mesma posição inicial, da mesma forma que ocorre sem a placa de atrito. A rotação ocorre mais rapidamente quanto menor o atrito isotrópico atribuído ao robô. O deslocamento do módulo 0 durante a rotação pode ser observado no gráfico da [Figura 46](#).

Figura 46 – Ciclo completo de rotação observado para $\mu = 0.1$ (primeira geometria)

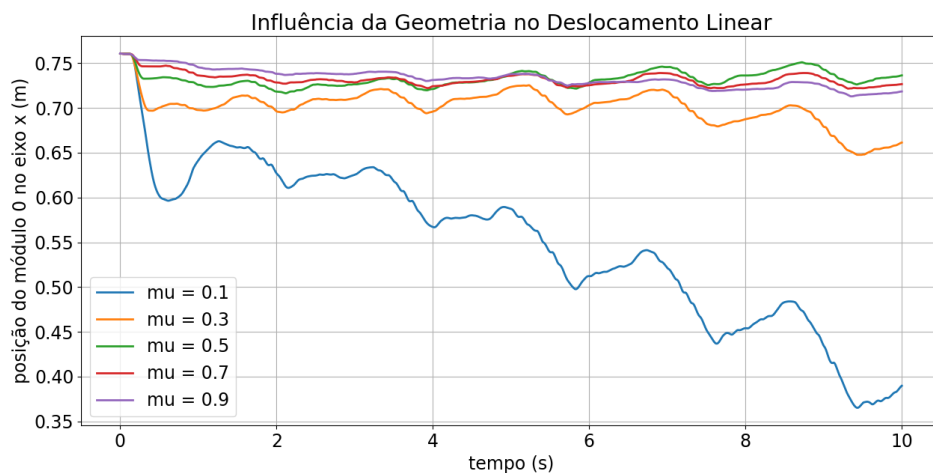


Fonte: De autoria própria.

5.5.2 Geometria de barreiras laterais

A segunda geometria mostrada na [Figura 44](#) foi testada seguindo os mesmos procedimentos. O teste foi realizado para diferentes valores de atrito e os resultados podem ser observados na [Figura 47](#).

Figura 47 – Deslocamento linear observado do módulo com a segunda geometria proposta

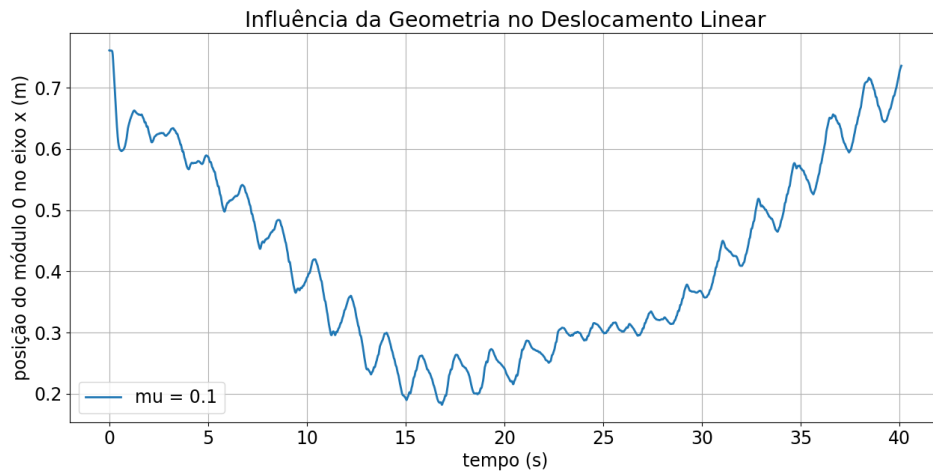


Fonte: De autoria própria.

Com a segunda geometria também não foi possível observar deslocamento linear, novamente o robô rotacionando e voltando para a posição inicial. A rotação do módulo cabeça para um valor de atrito 0.1 pode ser observada na [Figura 48](#).

Pode-se concluir que as geometrias propostas não são suficientes para induzir uma anisotropia no atrito entre o módulo e o solo de forma suficiente para gerar deslocamento

Figura 48 – Ciclo completo de rotação observado para $\mu = 0.1$ (segunda geometria)



Fonte: De autoria própria.

linear. Os resultados encontrados nas simulações condizem com os resultados dos testes de escorregamento realizados por (ROCHA, 2023), que também concluíram que as geometrias não geram anisotropia suficiente no atrito.

6 Conclusões

Este trabalho se propôs a analisar os principais aspectos da movimentação serpentina e como eles influenciam no deslocamento de um robô ápode, apoiando-se principalmente nos trabalhos (HIROSE; YAMADA, 2009), (GÓMEZ, 2008) e (GALEMBECK, 2018). Ao longo do trabalho, no [Capítulo 3](#) foram apresentadas as equações matemáticas que descrevem o movimento serpentina, no [Capítulo 4](#) foi proposto um módulo para construção de robô com movimento *yaw-yaw* e por fim no [Capítulo 5](#) os diferentes fatores que influenciam no deslocamento do robô ápode foram analisados em simulação.

A partir dos resultados obtidos na [subseção 5.4.1](#) foi possível entender como a curva serpenoide, proposta por Hirose, controla o deslocamento do robô por meio de seus parâmetros. Controlar o robô com a tabela de ângulos gerada pelas equações da curva discretizada permite alterar a direção, a velocidade e a estabilidade do deslocamento. É necessário otimizar os parâmetros da curva de acordo com o objetivo específico de cada robô e suas especificidades, tais como número de módulos, velocidade e torque máximo dos motores, ângulo máximo das juntas.

A característica anisotrópica do atrito é aspecto fundamental para o movimento serpentina. Na [subseção 5.4.2](#) foi observado por meio de simulação que sem anisotropia não é possível ter deslocamento no movimento serpentina, comprovando o que foi mostrado por David Hu em seus estudos com cobras (HU et al., 2008). Também se observou a importância de manter um atrito baixo na direção a favor do movimento, sendo favorável para o deslocamento linear sempre manter o menor atrito possível na direção do coeficiente μ_1 (paralela ao corpo do robô), mesmo que isso signifique diminuir a diferença de atrito entre as direções.

Na [seção 5.5](#) foi testada a teoria de que seria possível reproduzir o atrito anisotrópico no contato do robô com o solo utilizando placas de geometria fixa. Foram testadas duas placas com geometrias diferentes. De acordo com os resultados observados e o comportamento do robô na simulação, é possível concluir que as duas placas de geometria fixa propostas não são capazes de reproduzir atrito anisotrópico no módulo.

6.1 Trabalhos Futuros

Com os estudos e conclusões deste trabalho foram dados os primeiros passos para a construção de um robô ápode com movimentação serpentina, mas alguns pontos pendentes ainda devem ser desenvolvidos em trabalhos futuros. Para que as simulações se aproximem mais da realidade, pode-se incluir ruídos à simulação, utilizando por exemplo a técnica

estatística de Monte Carlo. Além disso, deve ser estudada uma forma de reproduzir o atrito anisotrópico no robô, uma vez que foi concluído que as placas de geometria fixa não são suficientes. É sugerido que seja feita uma mistura das geometrias propostas em (GALEMBECK, 2018) e em (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018), utilizando uma mistura de materiais de baixo atrito com materiais de alto atrito para forçar a característica anisotrópica no contato do robô com o solo. Após ser atingida a movimentação *yaw-yaw* com atrito anisotrópico, é recomendado que sejam propostas alterações para o módulo, se baseando nos modelos da série VDM na Figura 14, para intercalar as conexões entre *pitch* e *yaw*. Com a movimentação *pitch-yaw* seria possível otimizar e acelerar o deslocamento do robô. Por fim, como o robô montado na configuração *yaw-yaw*, é necessário repetir os testes realizados no Capítulo 5 para validar os resultados obtidos na simulação em um ambiente real.

Referências

- BORENSTEIN, J.; BORRELL, A. The OmniTread OT-4 serpentine robot. In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. P. 1766–1767. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543456](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543456). Citado na p. 17.
- BRENER, N.; BENAMAR, F.; BIDAUD, P. Analysis of self-reconfigurable modular systems: a design proposal for multi-modes locomotion. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004. 2004. v. 1, 996–1001 vol.1. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1307280](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307280). Citado na p. 13.
- EREKO, G. Relatório Técnico Sigma Lily. n. 1, p. 84, 2015. Citado nas pp. 19, 20, 23, 28, 30.
- GALEMBECK, T. F. **PROCESSO PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE ATRITO COM FINS DE FACILITAR MOVIMENTAÇÃO DE ROBÔ ÁPODE**. 2018. Monografia (Trabalho de Graduação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Citado nas pp. 22, 23, 39, 48, 49, 52, 53.
- GÓMEZ, J. G. **MODULAR ROBOTICS AND LOCOMOTION: APPLICATION TO LIMBLESS ROBOTS**. 2008. Tese (Doutorado). Citado nas pp. 14, 18, 25, 29, 39, 52.
- HAN, S.; CHON, S.; KIM, J.; SEO, J.; SHIN, D. G.; PARK, S.; KIM, J. T.; KIM, J.; JIN, M.; CHO, J. Snake Robot Gripper Module for Search and Rescue in Narrow Spaces. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 7, n. 2, p. 1667–1673, 2022. DOI: [10.1109/LRA.2022.3140812](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3140812). Citado na p. 13.
- HIROSE, S.; YAMADA, H. Snake-like robots [Tutorial]. **IEEE Robotics Automation Magazine**, v. 16, n. 1, p. 88–98, 2009. DOI: [10.1109/MRA.2009.932130](https://doi.org/10.1109/MRA.2009.932130). Citado nas pp. 13, 16, 26, 52.
- 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. 22, 25, 26, 39, 52.
- KOMURA, H.; YAMADA, H.; HIROSE, S. Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel. **Advanced Robotics**, Taylor Francis, v. 29, n. 17, p. 1081–1094, 2015. DOI: [10.1080/01691864.2014.971054](https://doi.org/10.1080/01691864.2014.971054). eprint: <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.971054>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01691864.2014.971054>>. Citado na p. 15.
- LILJEBÄCK, P.; PETTERSEN, K.; STAVDAHL, Ø.; GRAVDAHL, J. Experimental Investigation of Obstacle-Aided Locomotion With a Snake Robot. **Robotics, IEEE Transactions on**, v. 27, p. 792–800, set. 2011. DOI: [10.1109/TRO.2011.2134150](https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2134150). Citado na p. 17.

- MERZ, M.; TRANSETH, A. A.; JOHANSEN, G.; BJERKENG, M. SNAKE ROBOTS FOR SPACE APPLICATIONS, 2018. Disponível em: <https://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2017/2.%5C%20Thursday%5C%2022%5C%20June/7A%5C%20Mobility%5C%20and%5C%20Actuation/S.7A_09.50_Transeth.p>. Citado na p. 13.
- MORI, M.; HIROSE, S. Development of active cord mechanism ACM-R3 with agile 3D mobility. In: PROCEEDINGS 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180). 2001. v. 3, 1552–1557 vol.3. DOI: [10.1109/IROS.2001.977200](https://doi.org/10.1109/IROS.2001.977200). Citado na p. 15.
- OHASHI, T.; YAMADA, H.; HIROSE, S. Loop forming snake-like robot ACM-R7 and its Serpenoid Oval control. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. P. 413–418. DOI: [10.1109/IROS.2010.5651467](https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651467). Citado na p. 16.
- QIAO, G.; WEN, X.; LIN, J.; WANG, D.; WEI, Z. Sigmoid transition approach of the central pattern generator-based controller for the snake-like robot. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 2017. Citado na p. 27.
- ROCHA, G. B. **Análise Experimental de Aspectos de Comunicação, Construção e Atrito de Robô Ápode Bioinspirado (No Prelo)**. 2023. Monografia (Trabalho de Graduação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Citado nas pp. 37, 48, 49, 51.
- SEEJA, G.; SELVAKUMAR AROCKIA DOSS, A.; HENCY, V. B. A Survey on Snake Robot Locomotion. **IEEE Access**, v. 10, p. 112100–112116, 2022. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3215162](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3215162). Citado na p. 24.
- SELVARAJAN, A.; KUMAR, A.; SETHU, D.; RAMLAN, M. A. bin. Design and Development of a Snake-Robot for Pipeline Inspection. In: 2019 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). 2019. P. 237–242. DOI: [10.1109/SCORED.2019.8896254](https://doi.org/10.1109/SCORED.2019.8896254). Citado na p. 13.
- SOUSA, A. C. C. de. **Sensors in Modular Robotics for Pipeline Inspection: Design and Test of Erekebot- Module**. 2014. Citado na p. 34.
- 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). 2018. P. 6779–6785. DOI: [10.1109/ICRA.2018.8463177](https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8463177). Citado nas pp. 17, 18, 53.

TAKAYAMA, T.; HIROSE, S. Amphibious 3D active cord mechanism "HELIX" with helical swimming motion. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002. v. 1, 775–780 vol.1. DOI: [10.1109/IRDS.2002.1041484](https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041484). Citado na p. 16.

TOGAWA, K.; MORI, M.; HIROSE, S. Study on three-dimensional active cord mechanism: development of ACM-R2. In: PROCEEDINGS. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113). 2000. v. 3, 2242–2247 vol.3. DOI: [10.1109/IROS.2000.895302](https://doi.org/10.1109/IROS.2000.895302). Citado na p. 15.

YAMADA, H.; HIROSE, S. Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4. **Journal of Robotics and Mechatronics**, v. 18, n. 3, p. 305–311, 2006. DOI: [10.20965/jrm.2006.p0305](https://doi.org/10.20965/jrm.2006.p0305). Citado na p. 15.