



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO

Projeto de Graduação em Engenharia de Automação

Sistema Ocular Animatrônico para Aplicações em IHR

Marina Zanotta Rocha

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Automação da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia de Automação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo da Silva Guerra
Co-orientador: Eng. Me. Igor Pardo Maurell

Rio Grande, 2025

Dados de catalogação na fonte:

colocar NOME DO BIBLIOTECÁRIO – CRB-colocar número do crb do bibliotecário
Biblioteca Central – FURG

A999a

Rocha, Marina Zanotta

Sistema Ocular Animatrônico para Aplicações em IHR / Marina Zanotta Rocha. – Rio Grande, 2025. – 59 f: gráf. – Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Centro de Ciências Computacionais. Rio Grande, 2025. – Orientador Rodrigo da Silva Guerra; Coorientador Igor Pardo Maurell.

1. Rosto robótico. 2. Antropomorfismo. 3. Modelagem 3D. 4. Robótica social. I. Guerra, Rodrigo da Silva. II. Maurell, Igor Pardo. III. Título.

CDD: 999.9

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Carlos e Patrícia, por sempre me incentivarem a ir além das minhas próprias expectativas, obrigada por serem os professores mais importantes da minha vida. À minha irmã, Júlia, que acompanhou toda trajetória e sempre esteve me apoiando. Ao meu cachorro Krypto, por ser a companhia peluda que me acalma em momentos tensos, e me estressa em momentos de tédio. Aos familiares, que mesmo distantes foram presentes durante esse percurso. À tia Lenira, que está sempre torcendo por mim, seja na área acadêmica ou no esporte, muito obrigada.

Não posso deixar de agradecer aos amigos, que fazem parte da família, principalmente minha melhor amiga Dienifer, que esteve sempre ao meu lado, obrigada pelos conselhos e incentivos. Aos colegas, que se tornaram grandes amigos, Andressa, Gabriel, Murilo, Junior e Lucas, vocês foram essenciais nessa caminhada.

Agradeço à equipe FBOT, sem a qual esse trabalho não existiria, e me proporcionou muitas experiências e amizades valiosas. Em especial, aos meus veteranos Jardel, João, Emilly e Igor, que me acolheram no time.

Agradeço ao meu orientador Rodrigo Guerra, e ao coorientador Igor Maurell, por acreditarem e me guiarem neste trabalho. Principalmente pelas palavras de apoio que trouxeram conforto nos momentos de tensão.

Por fim, expresso minha gratidão quanto à Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pela estrutura e oportunidades que foram fundamentais na minha formação. Muito obrigada a todos que de alguma forma participaram dessa jornada.

*Nunca estou realmente satisfeita quanto a entender alguma coisa;
porque, até onde entendo, a minha compreensão só pode ser uma fração
infinitesimal de tudo o que eu quero compreender. — ADA LOVELACE*

RESUMO

ROCHA, Marina Zanotta. **Sistema Ocular Animatrônico para Aplicações em IHR.** 2025. 59 f. Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

Em vista que robôs de serviço estão cada vez mais comuns, a área de interação humano-robô (IHR) tem sido muito estudada. O presente trabalho tem como base o sistema animatrônico de BORIS, da equipe FBOT. Neste, são descritas as etapas de prototipagem de dois mecanismos oculares. Foram estudados dois modelos principais: ABENICS e *snake robots*. Inicialmente, o primeiro pareceu-se adequado a aplicação em questão, contudo, ao longo do desenvolvimento notou-se que os resultados obtidos eram inferiores aos desejados. Com o sistema adaptado de *snake robot* foi possível atingir os movimentos oculares próximos ao esperado. Assim, espera-se que esse projeto contribua com a evolução do robô BORIS, bem como no avanço da pesquisa na área de robótica social.

Palavras-chave: Rosto robótico, antropomorfismo, modelagem 3D, robótica social.

ABSTRACT

ROCHA, Marina Zanotta. **Animatronic Ocular System for HRI applications**. 2025. 59 f. Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

As service robots are becoming increasingly common, the field of human-robot interaction (HRI) has been extensively studied. This work is based on the animatronic system of BORIS, developed by the FBOT team. It describes the prototyping stages of two ocular mechanisms. Two main models were studied: ABENICS and snake robots. Initially, the first one seemed suitable for the intended application, however, as development progressed, it became evident that the results achieved were below expectations. With the system adapted from snake robots, it was possible to achieve eyes movements closer to the desired performance. Thus, it is hoped that this project contributes to the evolution of the BORIS robot, as well as to advancements in research in the field of social robotics.

Keywords: robotic face, anthropomorphism, 3D modeling, social robotics.

LISTA DE FIGURAS

1	Rosto animatrônico do robô BORIS.	14
2	Cena aos 38:08 do filme Shrek 2, a qual ilustra a expressão popular do Gato de Botas.	17
3	Gráfico que ilustra o conceito de Vale da Estranheza com base nos elementos relevantes a Mori.	18
4	Exemplo de um objeto de pareidolia.	19
5	Amostra de robôs domésticos que participaram da categoria <i>@home</i> na RoboCup 2024.	20
6	Eixos de rotação do olho humano.	21
7	Demonstração de um sistema ABENICS.	22
8	Projeto conceitual e modelo físico do robô HITSZ-Snakebot II. . . .	22
9	Diagrama da classificação de taxonomia de interfaces robóticas, no qual destaca-se em rosa as categorias a serem analisadas e em laranja, os aspectos que caracterizam o BORIS.	24
10	Robô Kismet.	27
11	Robô KOBIAN demonstrando medo.	28
12	Robô Muecas.	29
13	Cabeça animatrônica do robô InMoov.	31
14	Robô Eva 2.0.	32
15	Cabeça do robô MARKO.	33
16	Cabeça robótica Open.	34
17	Plataforma da cabeça robótica Adam.	36
18	Face animatrônica Jubileo.	37
19	Sistema interno do rosto de BORIS.	40
20	Diagrama do movimento horizontal ocular.	41
21	Diagrama do movimento vertical ocular.	42
22	Diagrama dos processos de manufatura FDM e DLP.	42
23	Diagrama do modelo 3D do sistema projetado, com um corte parcial do olho no plano frontal.	44
24	Diagrama do circuito de controle dos micro motores de passo. . . .	45
25	Micro motor de passo escolhido.	45
26	Microcontrolador ESP32.	46
27	Módulo Driver de motor A4988.	46

28	Versão 1 do protótipo de modelo ABENICS.	48
29	Versão 2 do protótipo de modelo ABENICS.	48
30	Comparação entre a qualidade de impressão das esferas: a)Fabricada em PLA em uma 3D Creality® Ender-3, baixa qualidade. b)Fabricada em PLA em uma 3D A1 BambuLab®, alta qualidade, mas ainda havia atrito. c) Fabricada em resina dental em uma 3D Creality® HALO-MAGE PRO, excelente qualidade, porém sua massa elevada resultou em travamentos.	49
31	Circunferências em que as engrenagens devem ser centralizadas, sendo a azul para o eixo vertical e a rosa para o eixo horizontal. . . .	49
32	Versão 3 do protótipo de modelo ABENICS.	50
33	Protótipo físico do modelo baseado em <i>snake robot</i>	51
34	Comparação entre a base giratória impressa em PLA (esquerda) e a mesma peça fabricada em resina dentária (direita).	52

LISTA DE TABELAS

1	Principais características dos rostos robóticos descritos nesse trabalho.	38
---	---------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IHR	Interação Humano-Robô
BORIS	Brazilian Open Robot for In-home Service
DoF	Degrees of Freedom
CHARMIE	Collaborative Home/Healthcare Assistant Robot
HERA	Home Environment Robot Assistant
FACS	Facial Action Coding System
DoRIS	Domestic Robotic Intelligent System
LED	Light Emitting Diode
CAD	Computer-aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
DLP	Digital Light Processing
PLA	Polylactic Acid

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Objetivos	15
2	Revisão bibliográfica	16
2.1	Fundamentação teórica	16
2.1.1	Interação Humano-Robô	16
2.1.2	Importância dos olhos	16
2.1.3	Vale da Estranheza	17
2.1.4	Antropoformismo e Pareidolia	18
2.1.5	Presença de rostos em robôs	19
2.1.6	Sistemas de olhos - BORIS	20
2.1.7	Sistemas de olhos robóticos	21
2.2	Estado da Arte	23
2.2.1	Rostos estáticos em robôs	25
2.2.2	Rostos digitais	25
2.2.3	Rostos híbridos	25
2.2.4	Rostos mecânicos	26
2.3	Conceitos técnicos aplicados à expressões faciais animatrônicas	39
3	Metodologia	40
3.1	Sistema horizontal de BORIS	40
3.2	Sistema vertical de BORIS	41
3.3	Modelagem e Prototipagem 3D	41
3.4	Sistema ABENICS	43
3.5	Sistema <i>Snake Robot</i>	43
3.6	Circuito	44
3.6.1	Micro motor de passo	45
3.6.2	ESP32	46
3.6.3	<i>Driver</i> A4988	46
4	Resultados	47
4.1	Modelo baseado em ABENICS	47
4.2	Modelo baseado em <i>Snake Robot</i>	50

4.3	Discussão dos resultados	52
5	Conclusão	54
5.0.1	Trabalhos futuros	54
	Bibliografia	55

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo serão discutidos os motivos que levaram ao desenvolvimento desse trabalho. O qual apresenta o processo de construção de um sistema mecânico de olhos para aplicação em um rosto animatrônico. Especificamente, o modelo projetado é focado no aperfeiçoamento do mecanismo atual do robô BORIS. Além disso, também serão descritos os objetivos do projeto.

1.1 Contextualização

Como robôs de serviço estão cada vez mais presentes no cotidiano, mostra-se relevante o estudo da interação humano-robô (IHR) aplicada a públicos diversos (Stroessner, 2020). Nesse contexto, é previsto que robôs atuem em ambientes com pessoas leigas no ramo de tecnologia, de modo que a aparência desses relaciona-se com o nível de conforto percebido (Broadbent et al., 2013).

Dessa forma, observa-se o desenvolvimento crescente de modelos de faces animatrônicas. Os principais elementos que costumam compor esses sistemas são: olhos, sobrancelhas e boca. Com esses é possível obter expressões básicas análogas à anatomia humana.

1.2 Justificativa

Tem-se como foco deste trabalho o robô BORIS (Figura 1), integrante da equipe de robótica FBOT¹ da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, o qual participa das competições da RoboCup@Home². O desenvolvimento da pesquisa de robótica doméstica desse grupo é focado em competições de níveis nacional e mundial. Além disso, em eventos com público externo, o BORIS costuma ser o ponto central ao promover o projeto FBOT e a relevância da robótica social.

¹Website da equipe de robótica: <https://fbot.vercel.app/fbothome>

²Website da competição mundial: <https://athome.robocup.org/>

Um diferencial desse robô em relação aos utilizados pelas demais equipes, é seu rosto animatrônico. De forma isolada, esse recurso não influencia diretamente na pontuação quantitativa das provas. Contudo, integrado às demais habilidades, contribui positivamente na avaliação qualitativa de interação social. Percebe-se que as pessoas tendem a direcionar o olhar para o rosto durante a comunicação verbal, e também, que costumam observar a direção da face para compreender a ação exercida. Assim, nota-se a relevância da cabeça animatrônica nesse robô, na execução autônoma de tarefas domésticas.

Figura 1: Rosto animatrônico do robô BORIS.



Fonte: Autoria própria, 2025

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho, consiste no desenvolvimento de um sistema ocular e de um conjunto funcional de pálpebras para aplicação em face animatrônica. Tem-se por finalidade a refatoração de dois sistemas do rosto de BORIS, de modo a torná-lo mais robusto. Para atendê-lo, tem-se como objetivos específicos os seguintes:

- **Estudar sobre o impacto da face na comunicação humana:** como o trabalho está relacionado com um robô social, vê-se como necessário compreender a influência da presença de um rosto na interação humano-robô;
- **Analisar rosto de BORIS:** com o foco de refatorar o sistema facial atual, é preciso compreender suas limitações mecânicas com base na literatura;
- **Modelar sistema ocular e de pálpebras em 3D:** a partir da análise comparativa entre o modelo animatrônico atual e as características humanas pretende-se modelar os sistemas de modo a obter movimentos mais amplos;
- **Prototipar os sistemas ocular e de pálpebras:** a construção dos protótipos será dada através da impressão 3D dos desenhos e montagem manual das peças;
- **Testar o protótipo:** integrar os modelos físicos do sistema ocular e do conjunto funcional de pálpebras, de modo a realizar testes manuais para avaliação dos movimentos;
- **Validar protótipo:** com o protótipo funcional, pretende-se desenvolver o controle de 6 estados básicos: neutro, feliz, triste, raiva, surpresa e sonolenta, bem como a rotina automática de piscar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão discutidas as fundamentações teóricas em que esse trabalho se baseia, bem como o estado da arte referente a projetos relacionados. Com esses espera-se explicar os conceitos aplicados no desenvolvimento desse trabalho e também apresentar a relevância na área de robótica social e de serviço.

2.1 Fundamentação teórica

Essa seção trata de princípios básicos relevantes para esse trabalho. Assim, são explicados pontos-chaves como: Interação Humano-Robô; Importância dos olhos; Vale da Estranheza; Antropomorfismo; Pareidolia e Importância da presença de rostos em robôs. Além desses, são apresentados os modelos mecânicos estudados para esse trabalho.

2.1.1 Interação Humano-Robô

Nota-se que, em geral, a comunicação emocional humano-humano é dada através de expressões não verbais (McGinn, 2019). Dessa forma, a influência de tal aspecto na interação humano-robô tem sido estudada no ramo interdisciplinar da robótica e da psicologia. Em vista da crescente presença de robôs de serviço no cotidiano, mostra-se relevante compreender a percepção dos usuários quanto a eles.

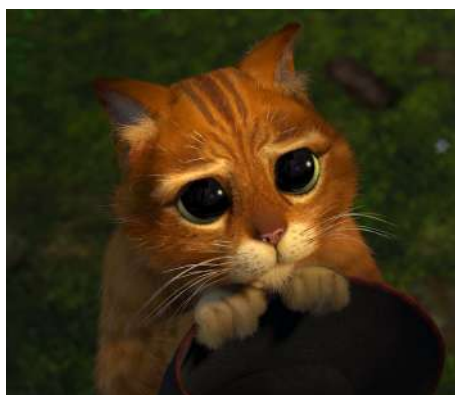
2.1.2 Importância dos olhos

Ao refletir sobre a citação de Cícero (Cicero, 1927) “*The face is a picture of the mind with the eyes as its interpreter.*” (“A face é uma imagem da mente sendo os olhos seus intérpretes”, tradução própria), observa-se que os olhos são essenciais nas expressões faciais. Estudos mostram que através da região ocular é possível exercer comunicação não verbal, incluindo demonstrar emoções e direcionar o olhar para área de atenção. Um exemplo disso pode ser observado pelos gestos do personagem Gato de Botas no filme *Shrek* (*Shrek 2* 2004). Em uma das cenas ele usa seu charme para persuadir os demais su-

jeitos a cumprirem com suas vontades. Em outra situação, ele aplica a mesma estratégia a fim de convencer seus adversários de que era inocente. Em ambos casos, não há diálogos entre os personagens, apenas alteração dos olhos de Gato de Botas, os quais são ressaltados através do aumento de suas pupilas e do seu brilho ocular. Isso faz com que sua aparência seja mais fofa, compatível com a de um ser indefeso, como pode ser observado na Figura 2.

Estudos sugerem que a percepção de pupilas dilatadas promovem uma noção de ser simpático (Juan Olvido Perea-García e Kret, 2024). Como no exemplo do Gato de Botas, pupilas destacadas tendem a causar respostas de afetividade positiva. Isso é uma ocorrência natural, baseada no fato de que bebês possuem olhos desproporcionalmente grandes em relação ao seu rosto, o que garantem a eles um alto grau de fofura. Dessa forma, é comum que pessoas com olhos grandes sejam atraentes, tendo em vista que essa característica pode ser notada como um sinal de juventude. Assim, é observado que pupilas grandes tendem a promover um alto grau de simpatia em seres sociais.

Figura 2: Cena aos 38:08 do filme *Shrek 2*, a qual ilustra a expressão popular do Gato de Botas.

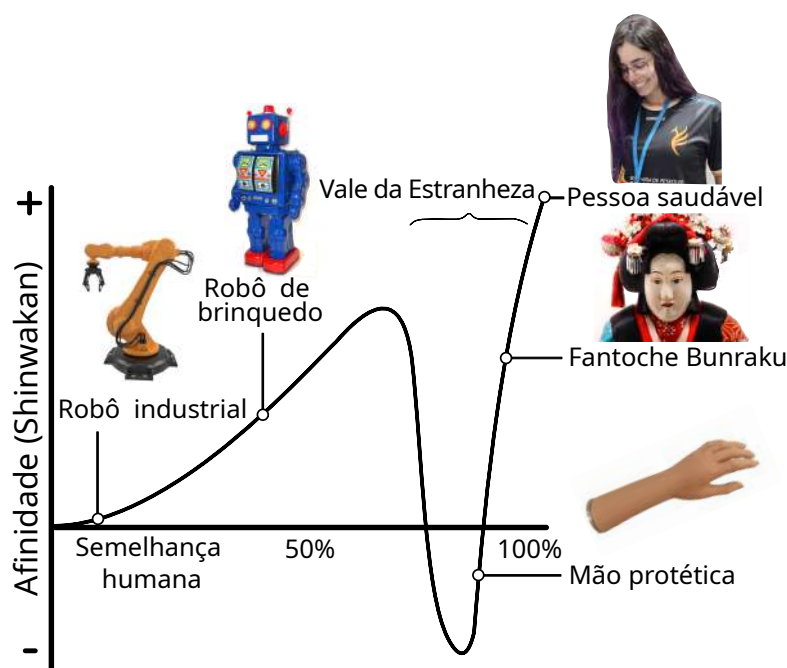


Fonte: Adaptado de *Shrek 2*, 2004.

2.1.3 Vale da Estranheza

Em 1970, Mori estabeleceu um conceito muito utilizado na robótica: o Vale da Estranheza. A Figura 3 introduz essa definição baseada nas vivências de Mori. Esse descreve que a semelhança de animais e máquinas com humanos pode impactar positivamente a reação das pessoas, desde que não haja uma quebra de expectativa quanto a isso (Mori, 1970). Por exemplo, robôs altamente similares aos humanos tendem a causar desconforto nos indivíduos, visto que, apesar de ínfimas, essas máquinas apresentam imperfeições que as diferenciam do orgânico. Assim, considera-se que as pessoas apresentam afinidade com elementos semelhantes a si, contanto que a presença excessiva de características humanas não gere o efeito do Vale da Estranheza, e cause emoções adversas.

Figura 3: Gráfico que ilustra o conceito de Vale da Estranheza com base nos elementos relevantes a Mori.



Fonte: Adaptado de Mori, 1970.

2.1.4 Antropoformismo e Pareidolia

O antropomorfismo é o conceito de atribuir qualidades humanas a animais e objetos, isso é aplicado em diversas áreas da robótica, em que frequentemente máquinas são esquematizadas com base em movimentos humanoides. Ao apresentar traços antropomórficos, é moldada a expectativa do observador quanto à capacidade do robô de realizar determinada tarefa. Um exemplo é a presença de um braço: observado esse elemento, é esperado que o robô consiga manipular objetos, mesmo que não possua essa habilidade. Isso impacta no nível de confiança percebido pelas pessoas (Stroessner, 2020).

Na robótica social, é comum a presença de rosto, visto que é tipicamente o ponto focal na interação humano-humano. Através dele que a comunicação verbal é exercida, além de abranger os principais elementos responsáveis pelas expressões não-verbais. O conjunto olhos, sobrancelhas, nariz e boca, que compõem o rosto, além de articularem gestos faciais e emoções, garantem uma assimetria que permite indicar a região de interesse ou espaço de atenção do indivíduo com quem se está interagindo. É natural que humanos identifiquem rostos até mesmo em objetos inanimados. Conhecido como pareidolia facial (Palmer e Clifford, 2020), além de atribuir o padrão de face em artefatos cotidianos, também é possível perceber a capacidade de comunicação. Ou seja, pode-se atribuir emoções ou até mesmo intenção a partir da observação de determinados objetos,

como o apresentado na Figura 4.

Nota-se que o conjunto de dois traços simétricos paralelos e um terceiro centralizado horizontalmente e deslocado para baixo, são o suficiente para que um rosto seja reconhecido, de modo que os olhos aparentam ser o principal elemento desse padrão. Ao experienciar o fenômeno de pareidolia, é ativada uma resposta sensorial de que se está na presença de um outro ser, o qual apresenta direção de atenção. Isso sugere que as pessoas sentem-se mais confortáveis a interagir com robôs que possuem rosto, desde que não caiam no Vale da Estranheza (Palmer e Clifford, 2020; Mori, 1970).

Figura 4: Exemplo de um objeto de pareidolia.



Fonte: Autoria própria, 2025

2.1.5 Presença de rostos em robôs

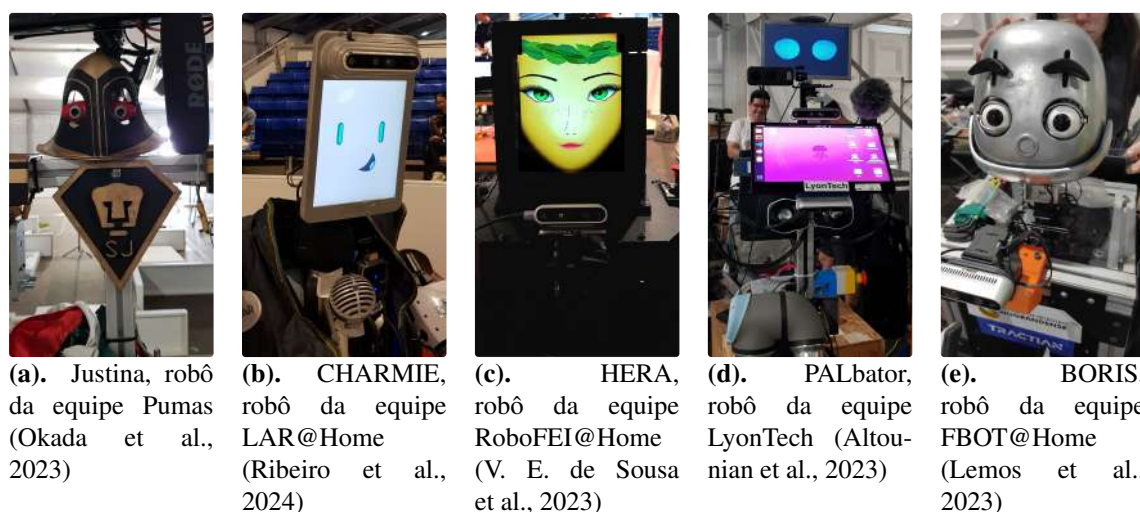
Estima-se que características de voz e aparência facial podem contribuir para o nível de conforto percebido. A presença de rosto permite demonstrar intenção, de modo que, ao manifestar emoções positivas e comportamento coerente, é provável que o robô seja percebido como um agente confiável (Kunold, Bock e Rosenthal-von der Pütten, 2023).

Além disso, direcionar o olhar para a ação a ser executada também influencia positivamente na colaboração entre pessoas e robôs de serviço. Atributos antropomórficos que permitem essa comunicação não-verbal, tendem a indicar um domínio de conhecimento sobre a tarefa desempenhada. Como observado na pareidolia facial, os olhos são o ponto chave no reconhecimento do rosto. Não apenas relevantes por comporem o padrão, mas também são o principal elemento nas expressões faciais. Através do conjunto de olhos e pálpebras é possível indicar a direção do olhar, bem como o estado emocional. Para os humanos, são os responsáveis pelo sentido da visão, no caso dos robôs, mesmo que não possua câmeras nessa posição, a presença de olhos confere a impressão da capacidade de observação.

A Figura 5 apresenta algumas faces de robôs que participaram da RoboCup@Home

2024, dentre elas algumas são telas e outras são tridimensionais. Percebe-se que os olhos são o único elemento constante nos modelos apresentados, localizados na parte superior, físico ou virtual passam a ideia da direção que o robô está observando e indicam a frente dele. Embora alguns sejam capazes de se locomover lateralmente e de ré, é preferível que o robô navegue para onde o rosto aponte, principalmente em ambientes sociais. Desse modo, pode-se ter uma noção de previsibilidade, que em conjunto com a realização de movimentos de forma suave, influenciam positivamente na percepção de conforto.

Figura 5: Amostra de robôs domésticos que participaram da categoria *@home* na RoboCup 2024.



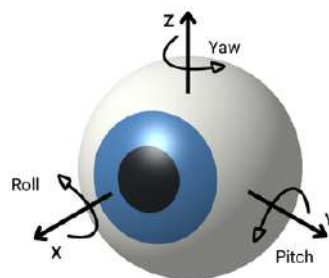
Fonte: Autoria própria, 2025

2.1.6 Sistemas de olhos - BORIS

O olho humano possui 3 graus de liberdade (no inglês, Degrees of Freedom – DoF), capaz de rotacionar nos três eixos: *roll*, *pitch* e *yaw*, como mostra a Figura 6. Com esse escopo, os principais movimentos oculares são vertical, para direcionar o olhar para cima e para baixo, e o horizontal, em que a pupila pode se deslocar lateralmente do ponto mais próximo ao mais afastado do nariz. É estimado que a amplitude de rotação em *pitch* seja de 75° , enquanto que em *yaw* é de aproximadamente 90° . Como a faixa angular do eixo *roll* é pouco perceptível ao natural, é comum que a rotação nesse eixo seja desprezada em sistemas mecânicos faciais (Penčić et al., 2022).

Atualmente, os olhos de BORIS contam com dois DoF: horizontal e vertical, os quais são acionados em conjunto. Isso pode dificultar os ajustes de posicionamento, bem como limitar a amplitude de movimento.

Figura 6: Eixos de rotação do olho humano.



Fonte: Autoria própria, 2025

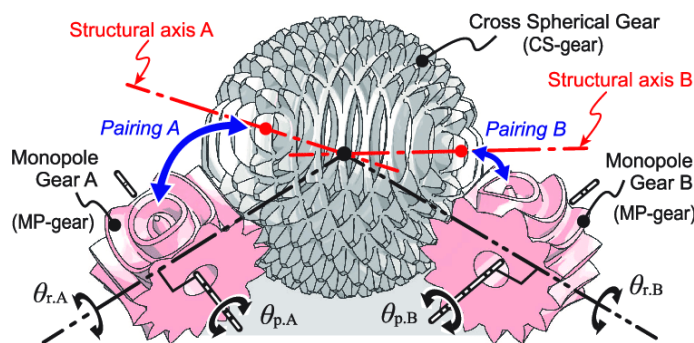
2.1.7 Sistemas de olhos robóticos

A partir dos conceitos apresentados na Seção 2.1.1 investigou-se sobre métodos que poderiam ser aplicados em sistemas oculares animatrônicos. Dessa forma, definiu-se que a estrutura mecânica deveria ser compacta e que a amplitude dos movimentos teria que ser semelhante à humana. A fim de evitar o Vale da Estranheza, considerou-se que o desenho dos olhos poderia ser baseado no modelo de BORIS, o qual consiste em um estilo cartunesco. Assim, foram estudados dois mecanismos principais para construção do protótipo.

2.1.7.1 Sistema ABENICS

A partir da análise do conjunto ocular atual, propõe-se elaborar um mecanismo individual para cada olho. Assim, um dos estudos que se mostrou relevante em relação ao movimento orbital é o modelo ABENICS (Abe, K. Tadakuma e R. Tadakuma, 2021). Este consiste em um sistema de rotação de 3 DoF, composto por uma engrenagem esférica associada à duas engrenagens monopolares, Figura 7. A esfera é acoplada a um suporte fixo, e as demais engrenagens são conectadas aos motores, o formato dessas possibilita o movimento similar ao de engrenagens retas. Além disso, permite que a engrenagem esférica deslize de forma passiva entre as outras.

Figura 7: Demonstração de um sistema ABENICS.



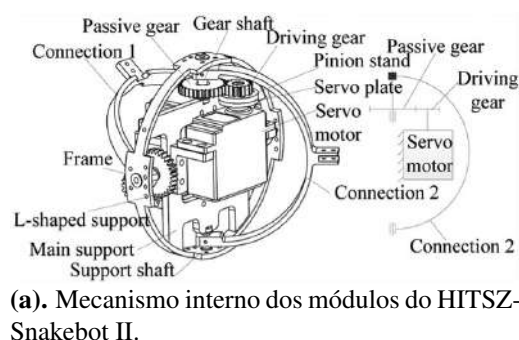
Fonte: Abe, K. Tadakuma e R. Tadakuma, 2021.

2.1.7.2 Sistema Snake Robot

Snake Robot (do inglês, robô cobra), são robôs biomiméticos inspirados na mobilidade de cobras. Estudos nessa área são relatados desde a década de 1940, sendo que o primeiro *snake robot* foi desenvolvido pelo Professor Shigeo Hirose em 1972. Desde então, esse ramo da robótica tem sido cada vez mais explorado. Por serem compactos e ágeis, eles são comumente aplicados à situações de desastres, como terremotos, enchentes, e incêndios, por exemplo (Seeja, Selvakumar Arockia Doss e Hency, 2022). Versões ainda mais reduzidas desse tipo de robôs podem ser empregadas no contexto médico, mais especificamente em cirurgias (Seetohul e Shafiee, 2022).

Um exemplo de *snake robot* encontrado na literatura é o HITSZ-Snakebot II (Mu et al., 2017). Seu sistema consiste na combinação de 8 módulos esféricos com 2 DoF, nos quais são contidos 2 motores. A Figura 8 ilustra o mecanismo de *snake robot* estudado para este trabalho.

Figura 8: Projeto conceitual e modelo físico do robô HITSZ-Snakebot II.



Fonte: Adaptado de Mu et al., 2017.

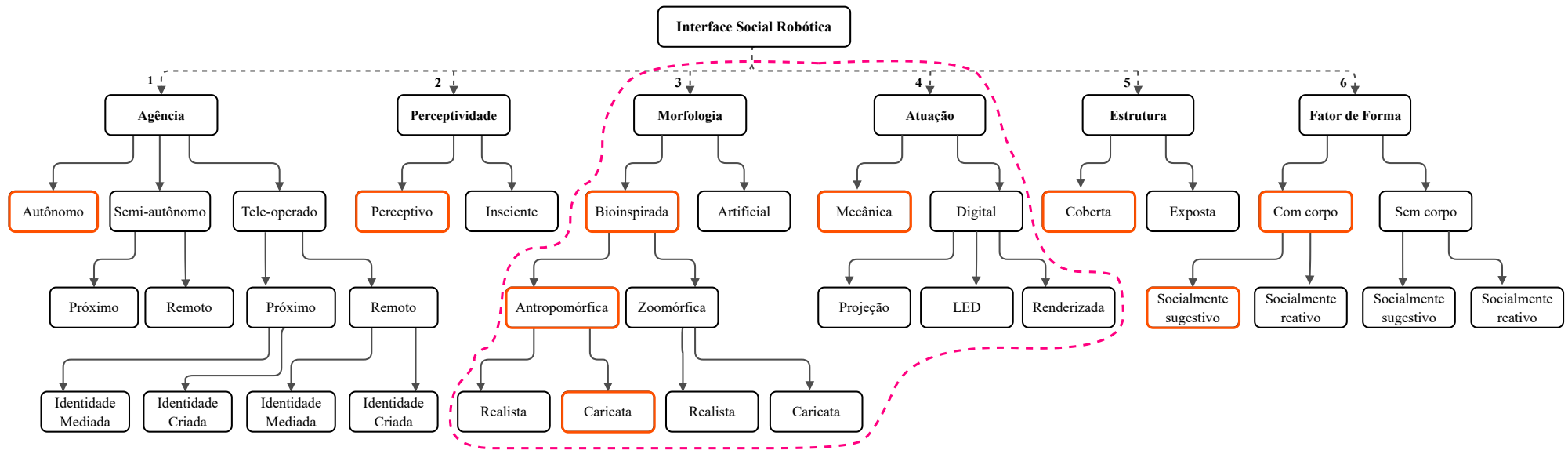
Estima-se que a amplitude angular desse modelo seja de aproximadamente 90°, tanto em *pitch* quanto em *yaw*. Essa extensão de movimento é maior que a capacidade de rota-

ção do globo ocular humano, o que faz com que esse sistema seja apto a ser adaptado para este projeto. O diâmetro de cada módulo é de 103mm, e devido a estrutura ser majoritariamente metálica, sua massa é de 335g. Em relação a esses aspectos, é preciso adequar o tamanho para que o olho seja proporcional ao robô BORIS. Também é necessário que o mecanismo seja mais leve, para garantir estabilidade no sistema.

2.2 Estado da Arte

Nesta seção são apresentados alguns exemplos de rostos encontrados na literatura. Baseado na classificação de taxonomia elaborada por (McGinn, 2019), considerou-se que as categorias relevantes para esse trabalho são a morfologia e tipo de atuação. Na Figura 9 é apresentado um diagrama de taxonomia de interfaces robóticas, nele está destacado em tracejado rosa as características a serem discutidas. Observa-se que os aspectos que qualificam BORIS estão realçados em laranja.

Figura 9: Diagrama da classificação de taxonomia de interfaces robóticas, no qual destaca-se em rosa as categorias a serem analisadas e em laranja, os aspectos que caracterizam o BORIS.



Fonte: Adaptado de McGinn, 2019.

2.2.1 Rostos estáticos em robôs

Alguns robôs que atuam em ambientes com pessoas contêm uma face robótica onde são localizados os sensores (Rojas-Quintero e Rodríguez-Liñán, 2021). Entretanto, esse recurso é utilizado apenas para gerar uma impressão de agência nesses robôs. Dessa forma, é comum que as câmeras desses robôs sejam dispostas na região dos olhos e auto falantes na área da boca. Alguns exemplos de rostos robóticos com expressão estática são: NAO¹; Pepper²; Robovie-V4³ e Romeo⁴.

2.2.2 Rostos digitais

Os métodos mais comuns de expressar emoções sem partes mecânicas é a projeção da face ou a utilização de telas (Rojas-Quintero e Rodríguez-Liñán, 2021). Para o primeiro, dispõem-se de um projeto interno à estrutura da cabeça, cuja parte frontal é revestida por uma máscara de material translúcido. Alguns exemplos de robôs que esse recurso está presente são: SociBot™; Albert HUBO⁵ e Furhat (Al Moubayed et al., 2012).

O outro modo de representar rostos virtuais é através de telas digitais. Esses variam de modelos simples focados nos olhos, como o EyePi, BEO e PALbator (Ven, 2017; Pretto, 2022; Altounian et al., 2023), até mais complexos como Robio⁶; HERA e CHARMIE ((V. E. de Sousa et al., 2023; Ribeiro et al., 2024)). Esse tipo pode apresentar vantagens como leveza e facilmente modificável, em relação a outros modelos de rostos. Entretanto, sua visibilidade pode ser reduzida dependendo da intensidade de luz do ambiente e do ângulo de observação do usuário. E no caso de telas, como a ampla maioria é plana, isso dificulta o formato antropomórfico do rosto (McGinn, 2019).

2.2.3 Rostos híbridos

Observa-se que certos rostos robóticos combinam partes mecânicas com o uso de LEDs (do inglês, *Light Emitting Diode*) para demonstrar expressões faciais. Esses modelos híbridos podem apresentar uma amplitude de gestos similar ao natural, alguns exemplos são: MARKO; iCub e Twente *humanoid head* (Penčić et al., 2022; Metta et al., 2010; Reilink et al., 2011). Outros robôs associam esses recursos para intensificar as ex-

¹Website para mais informações sobre o robô NAO: <https://corporate-internal-prod.aldebaran.com/en/nao>

²Website para mais informações sobre o robô Pepper: <https://us.softbankrobotics.com/pepper>

³Website para mais informações sobre o robô Robovie-V4: <https://robots.ros.org/robovie-r4/>

⁴Website para mais informações sobre o robô Romeo: http://doc.aldebaran.com/2-5/home_romeo.html

⁵Website para mais informações sobre o robô Albert HUBO: <https://www.hansonrobotics.com/albert-hubo/>

⁶Website para mais informações sobre o robô Robio: <https://www.humanrobotics.ai/>

pressões, semelhante à personagens de desenho, como é o caso de: Flobi; Robothespian⁷ e KOBIAN (Lütkebohle et al., 2010; Kishi et al., 2013).

2.2.4 Rostos mecânicos

A categoria de rostos robóticos mecânicos abrange uma gama de modelos encontrados na literatura. É comum que modelos altamente humanóides apresentem mecanismos juntamente com artifícios acrescentam realismo ao robô. Se encaixam nessas características robôs como por exemplo: Zeno, Sophia e Little Sophia da Henson Robotics®; Geminoid; Erica e HRP-4C (Nishio, Ishiguro e Hagita, 2007; Glas et al., 2016; Nakaoka et al., 2009).

Uma subclassificação de rostos mecânicos são os animatrônicos, os quais são caracterizados por apresentarem aspectos antropomórficos ou zoomórficos, mas com um certo grau de irrealismo. A face de BORIS pode ser categorizada como antropomórfica cartunesca. Assim, considerou-se alguns modelos desse tipo para uma análise comparativa com esse trabalho.

2.2.4.1 Kismet

Um dos principais rostos robóticos na literatura é o Kismet (Figura 10), criado com o intuito de interagir com pessoas de maneira natural. Ele apresenta um sistema nervoso artificial baseado no desenvolvimento social infantil humano, tendo como objetivo o aprendizado constante a partir de brincadeiras e conversas, interações similares a de um adulto e uma criança. Isso possibilita que Kismet se torne um agente social e apresente expressões faciais antropomórficas (Breazeal, 2002).

Apesar de apresentar traços humanóides, seu design não é uma representação humana, e sim uma criatura fictícia com aparência juvenil. Kismet possui um pescoço com 3 DoF, de modo que além de rotacionar vertical e horizontalmente a cabeça, ele também consegue inclinar-se para frente e para trás, como se estivesse se aproximando ou se afastando. Isso é utilizado conforme a distância entre o objeto ou pessoa e o robô para que o campo de visão da câmera seja adequado, mas esse comportamento pode ser percebido como a resposta social humana à invasão do seu espaço pessoal. Suas orelhas élficas têm 2 DoF cada, são capazes de se movimentar no sentido vertical e de rotacionar no próprio eixo. Esse diferencial possibilita a combinação de expressões animais e humanas. As sobrancelhas são de formato curvo com 2 DoF, podem se mover verticalmente e se arquear em volta dos olhos.

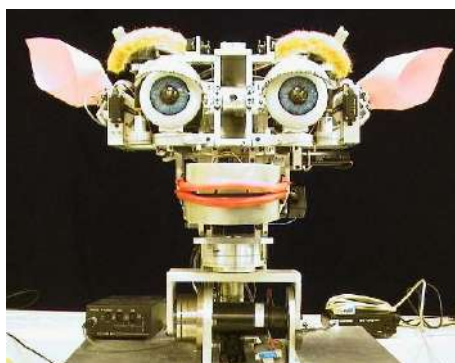
Esse rosto contém apenas as pálpebras superiores, essas são independentes entre si, o que permite a piscada por um olho ou que ambos pisquem simultaneamente. A boca é

⁷Website para mais informações sobre o robô Robothespian: <https://engineeredarts.com/robot/robothespian/>

composta por dois lábios flexíveis, os quais contém um atuador em cada extremidade, que movimentam-se para cima (expressões positivas) ou para baixo (expressões negativas). Além disso, também apresenta 1 DoF na mandíbula, que em conjunto com os lábios, garante que a boca abra e feche conforme a fala do robô.

Em relação aos olhos, cada um contém uma câmera embutida na pupila que auxiliam no controle de direção do olhar, de modo que a rotação em *yaw* é independente. O movimento em *pitch* é conjunto aos olhos e às pálpebras, como esse sistema engloba mais elementos do que a anatomia humana, ele apresenta algumas limitações de expressões. Além disso, os mecanismos são estruturados por perfis de alumínio, apesar de resistentes, isso pode dificultar alterações ou reparos no projeto, e também faz com que Kismet tenha a massa de aproximadamente 7kg. Para um robô de bancada como esse, essa característica não apresenta grande relevância, entretanto, para robôs móveis que contém cabeça, é desejável que esse recurso seja leve e adaptável.

Figura 10: Robô Kismet.



Fonte: Breazeal, 2002.

2.2.4.2 KOBIAN

KOBIAN é um robô de serviço, desenvolvido com o foco em pesquisa para interação humano-robô e execução de tarefas cotidianas, (Kishi et al., 2013). Esse conta com uma cabeça animatrônica capaz de expressar 6 emoções básicas de Ekman (Ekman, Friesen e Ellsworth, 1972): raiva, tristeza, felicidade, surpresa, nojo e medo, além do estado neutro.

Embora seja humanoide, seus gestos faciais aparentam ser mais acentuados em relação aos humanos, remetendo a personagens no estilo mangá. Isso é evidente pela amplitude de movimentos das sobrancelhas, em que cada uma apresenta 4 DoF e podem extrapolar o formato curvilíneo, como exemplifica a Figura 11. Outro elemento que destaca seu estilo cartunesco é o material eletroluminescente que reveste sua estrutura interna, o qual possibilita que sua testa seja colorida de azul ao demonstrar medo ou tristeza.

Assim como as sobrancelhas, seu lábio é feito de um material flexível, possui 4 pontos

de controle e um quinto ponto fixo centralizado na parte superior da boca, além disso, também é capaz de mover a mandíbula. Isso permite que a seção inferior do lábio se estenda mais do que a superior, de forma análoga aos humanos, e também que seja capaz de abrir e fechar a boca.

Suas pálpebras inferiores, possuem 1 DoF de rotação em *pitch*, as superiores também podem ser movidas nesse eixo, e elas têm 1 DoF adicional em *roll* aplicado principalmente para evitar colisões com o sistema ocular. Desse modo, o robô é capaz de emular a ação de piscar e expressar emoções negativas de maneira mais enfática. Ambos mecanismos das sobrancelhas e pálpebras consistem em estruturas de polias, o que adiciona complexidade ao sistema e deixa-o suscetível a eventuais falhas.

Os olhos são movidos em conjunto em *pitch* e separados em *yaw*, isso possibilita que KOBIAN apresente direção do olhar, além de influenciar positivamente nas emoções expressadas. Entretanto, como seu mecanismo é semelhante a um gimbal, há uma limitação do espaço interno, de forma que é necessário que as sobrancelhas sejam deslocadas em *roll*, e que tubos flexíveis combinados com hastes metálicas fossem utilizados ao invés de rolamentos, que seriam os componentes adequados ao sistema.

Figura 11: Robô KOBIAN demonstrando medo.



Fonte: Kishi et al., 2013.

2.2.4.3 Muecas

A cabeça robótica Muecas (Cid et al., 2014), foi projetada em estilo caricato com o objetivo de que sua desproporcionalidade de tamanho dos elementos resultasse em um modelo antropomórfico pouco realista, a qual é apresentada na Figura 12. Assim, o rosto evita o Vale da Estranheza (Mori, 1970) e ainda atrai a atenção do usuário, visto que sua proposta não é imitar a anatomia humana, mas garantir que seus movimentos sejam percebidos como naturais e que suas expressões sejam identificadas facilmente. Muecas também utiliza sensores de visão, áudio e inércia, que permitem que o robô perceba o

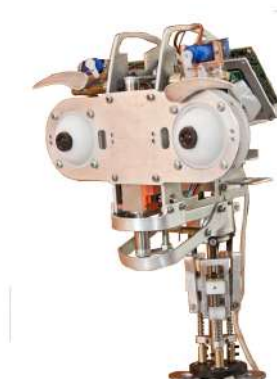
mundo de forma análoga aos humanos.

Seu pescoço possui 4 DoF, além dos movimentos em *pitch* e *yaw*, esse é capaz de inclinar a cabeça em *roll*, eixo comumente desconsiderado em cabeças animatrônicas. E também consegue mover-se verticalmente, similar à ação humana de se espichar para ver algo fora de seu alcance, assim como os demais, consiste em um mecanismo de movimento linear com juntas esféricas. Embora possibilite alta amplitude de mobilidade, isso eleva a complexidade de controle do robô. A boca possui apenas 1 DoF, que permite simular o movimento humano de abrir e fechar, para isso sua mandíbula é conectada com uma haste metálica ao extensor plástico do eixo do motor.

As sobrancelhas têm liberdade de movimento em *roll* e indiretamente em *pitch*, de modo que os motores que controlam verticalmente rotacionam os motores do outro eixo, nos quais as sobrancelhas estão acopladas ao atuador do mesmo modo que a estrutura da mandíbula. Esse tipo de conexão pode causar imprecisões no sistema, visto que a longo prazo o metal pode desgastar o plástico e resultar em folgas entre as peças.

Seus olhos podem ser rotacionados em *yaw* de forma independente, e o movimento em *pitch* é comum a ambos através de um sistema de fuso linear. Assim como Kismet, a estrutura de Muecas é majoritariamente metálica, o que resulta em uma massa elevada, bem como dificulta eventuais alterações no sistema. Seus mecanismos também são visíveis, o que somado a ausência de pálpebras pode impactar negativamente o nível de conforto percebido pelos usuários, além de ser suscetível à baixa durabilidade devido à exposição do circuito e da estrutura.

Figura 12: Robô Muecas.



Fonte: Cid et al., 2014.

2.2.4.4 InMoov

InMoov é um robô *open source* de tamanho real desenvolvido pelo francês Gäel Langevin, sua cabeça é mostrada na Figura 13. Seu projeto foi estruturado para ser facilmente replicável e aplicável nas áreas de pesquisa e educação. Ele conta com módulos de reconhecimento de voz e câmeras para detecção de objetos e faces, também possui Inteligência Artificial integrada, o que possibilita o uso de linguagem natural em conversas. Além disso, o modelo é dividido em múltiplas peças para que sua fabricação seja viável até mesmo com impressoras 3D de pequeno porte (Langevi, 2025).

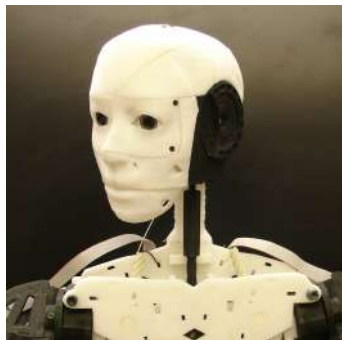
Seu pescoço possui 3 DoF, o qual é capaz de executar movimentos de rotação em *pitch* e *yaw* e inclinar a cabeça lateralmente em *roll*. Isso é realizado através de um sistema de fusos helicoidal, acionado por 3 atuadores independentes. Tendo em vista que as partes que constituem esse mecanismo são de material plástico, é comum que haja desgastes entre as peças devido ao atrito.

A cabeça conta com uma estrutura móvel para o maxilar, o qual conta com 1 DoF. Este é acionado em sincronia com as falas do robô. Seu mecanismo conta com apenas 1 servo motor posicionado na extremidade esquerda, enquanto o outro lado é conectado em um eixo passivo. Como seu sistema é assimétrico, isso pode impactar na precisão dos movimentos, bem como no alinhamento das peças. Além disso, a mandíbula possui uma saliência para representar o lábio inferior, o que pode ser percebido como uma incoerência, pois há uma mobilidade nessa região mas a expressão da boca é fixa.

Os olhos compreendem as câmeras do robô, seus movimentos em *pitch* e *yaw* são de forma conjunta, com um servo motor em cada eixo. Isso limita a amplitude de rotação dos globos oculares em comparação com a anatomia humana, além de dificultar a manutenção do sistema. Também observa-se que as cavidades para os olhos são mais estreitas que as pupilas, o que reduz a visibilidade desses elementos.

Embora sua estrutura externa apresente nariz antropomórfico, incomum à maioria dos rostos animatrônicos, nota-se a ausência de pálpebras e sobrancelhas, componentes que têm grande influência nos gestos faciais. Recentemente foi lançada a segunda versão do InMoov, a qual contém esses elementos faltantes na versão inicial, o que pode aumentar a capacidade de expressões. Nota-se que ambos modelos apresentam alto nível de irrealismo, de modo que a cabeça InMoov evita o Vale da Estranheza.

Figura 13: Cabeça animatrônica do robô InMoov.



Fonte: Langevin, 2015.

2.2.4.5 Eva 2.0

Eva 2.0 é uma evolução da Eva 1.0 (Faraj et al., 2021), a qual consiste em uma face robótica animatrônica, demonstrada na Figura 14, (Chen et al., 2021). Ela foi desenvolvida com o intuito de ser acessível e *open source*, em vista que os demais robôs semelhantes a esse costumam ser privados e de custo elevado. Assim, através do seu projeto aberto, Eva facilita que pesquisadores explorem a comunicação humano-robô nas áreas relacionadas à inteligência artificial, robótica social e psicologia. Além disso, a maior parte de suas peças foram fabricadas em impressões 3D, com estimativa de aproximadamente 2,5kg de filamento. Isso, não apenas resulta em um protótipo leve, como também pode ser reproduzido com poucos recursos.

Fixado a uma plataforma de acrílico, seu pescoço conta um sistema complexo de 6 DoF, o qual consiste em um mecanismo de juntas esféricas controlado através de 6 servo motores distribuídos em pares em uma base hexagonal. Isso possibilita que Eva mova a cabeça de maneira similar às ações humanas de baixar e levantar como se estivesse acenando e de inclinar-se lateralmente.

O robô conta com uma máscara de silicone acoplada ao seu crânio artificial para simular expressões faciais de maneira orgânica. Essa contém 10 pontos de controle, distribuídos de forma simétrica e conectados aos motores por meio de fios de *nylon*, esse sistema opera de forma análoga aos músculos na face humana. O mecanismo engloba a região das sobrancelhas, as quais são demarcadas apenas por saliências na pele sintética, de modo que não há peças à parte nem desenho desse elemento, o que pode dificultar a interpretação dos movimentos realizados. Além dessa, também abrange a seção dos lábios com amplitude de abertura de 20°, enquanto que a média humana é acima de 36° (Muto e Kanazawa, 1996). Isso combinado à ausência de maxilar articulável, pode resultar em movimentos pouco naturais tanto nas demonstrações de emoções quanto na reprodução de falas.

Seus olhos possuem mecanismos independentes, de forma que os globos oculares são conectados por 3 hastes acopladas com juntas esféricas aos servomotores, em que 2 são responsáveis pelo movimento horizontal e a terceira pelo vertical. A amplitude angular de ambos sentidos é de aproximadamente 20°, resolução inferior à capacidade humana (Penčić et al., 2022). Além disso, possui apenas as pálpebras superiores, as quais também são controladas individualmente. Apesar de seu formato antropomórfico, por elas serem posicionadas no interior da máscara, a cavidade da pele artificial não altera seu formato, o que difere da anatomia humana em que a pálpebra é uma estrutura da pele orgânica.

É válido mencionar que os circuitos e mecanismos de Eva 2.0 são cobertos pelas partes superior e traseira do crânio, além da frontal revestida com a máscara de silicone. Entretanto, o mecanismo do pescoço é deliberadamente exposto, pela mesma razão que sua pele artificial é azul, seus desenvolvedores propõem que essas características enfatizam o não-realismo de Eva, a fim de evitar o Vale da Estranheza (Faraj et al., 2021). Apesar desse cuidado, foram relatados casos de desconforto percebido durante sua interação com pessoas, é possível que isso seja percebido em função de seus olhos serem réplicas humanas e da presença de dentes na boca, elementos que remetem à uma figura orgânica.

Figura 14: Robô Eva 2.0.



Fonte: Adaptado de Chen et al., 2021.

2.2.4.6 MARKO

MARKO (Figura 15) é um robô humanoide desenvolvido para auxiliar no tratamento de crianças com paralisia cerebral (Penčić et al., 2022). Sua construção levou em consideração dois aspectos principais: ele deveria ser capaz de demonstrar os exercícios terapêuticos e também ter aparência amigável. Assim, MARKO conta com as habilidades sociais de conversação verbal e de expressões e gestos faciais.

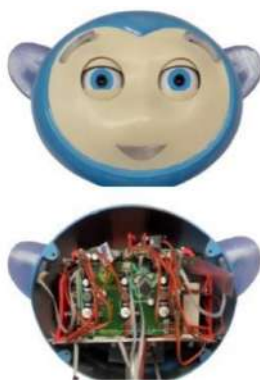
A cabeça robótica pode ser considerada híbrida, pois utiliza LEDs nas regiões da boca e orelhas e partes mecânicas nas seções dos olhos, pálpebras e sobrancelhas. Os LEDs possibilitam o uso de cores para intensificar as emoções demonstradas, entretanto isso

pode limitar as expressões de fala, visto que o formato da boca é constante, sendo incapaz de realizar a ação de abrir e fechar. Os demais são constituídos de 3 mecanismos de 4 barras independentes entre si.

As sobrancelhas possuem 3 DoF, em que ambas compartilham o sistema de fuso linear para o deslocamento vertical, e são capazes de rotacionar através dos mecanismos de 4 barras individuais. Isso possibilita que os movimentos das sobrancelhas sejam semelhantes ao natural. As pálpebras são controladas de maneira similar, com mecanismos de 4 barras isolados para cada uma, de modo que as inferiores apresentam menor amplitude do que as superiores. Além disso, sua velocidade varia de acordo com a ação a ser expressada, como piscar ou alterar a direção de atenção, análogo ao modelo humano. Seus olhos possuem 3 DoF, também guiados através de mecanismos de 4 barras, suas juntas esféricas permitem que os movimentos em *pitch* e *yaw* sejam independentes ou simultâneos. A construção desses levou em consideração a anatomia humana, garantindo que a amplitude angular fosse o mais antropomórfica possível.

Embora os sistemas de sobrancelhas, pálpebras e olhos tenham sido desenvolvidos para representar aspectos humanoides, os mecanismos de 4 barras podem resultar em limitações de adaptabilidade. Devido à sua complexidade e o espaço necessário para compreender essas estruturas, considera-se que o projeto de MARKO pode ser ineficiente.

Figura 15: Cabeça do robô MARKO.



Fonte: Adaptado de Penčić et al., 2022.

2.2.4.7 Robô Open

Com o objetivo de desenvolver uma cabeça robótica humanoide capaz de reproduzir expressões realistas, pesquisadores vietnamitas basearam-se no FACS para construção do robô Open (Nguyen Khac et al., 2022). Embora a estimativa seja de que esse protótipo consiga replicar mais de 94% dos movimentos humanos, por não haver distinção de cor e material entre as partes, e pelo fato de seus mecanismos serem expostos, é provável que o

robô cause desconforto nos usuários. Um exemplo de configuração desse robô é mostrado na Figura 17.

Os movimentos do pescoço são simulados através de um mecanismo de 4 barras, o qual conta com 2 atuadores e possibilita 3 DoF. Dessa forma, a cabeça é capaz de mover-se em *pitch* e *yaw*, além de inclinar-se em *roll*, com amplitude similar à humana. Seus lábios possuem 8 pontos móveis, os 3 vértices inferiores e os 3 superiores são controlados independentemente por mecanismos de 4 barras, as 2 extremidades são conduzidas por sistemas complexos de 5 barras. Esses pontos são revestidos por um material flexível, o qual possibilita que seu formato seja ajustável conforme a fala. Esses módulos são combinados ao mecanismo de 5 barras da mandíbula, o qual simula a abertura e fechamento da boca. Além disso, para uma aparência mais antropomórfica, foram adicionados dentes nesta região, entretanto, por não serem cobertos pelos lábios, esses elementos podem causar sentimentos adversos nas pessoas.

Seus olhos possuem 2 DoF, de forma que os movimentos em *pitch* e *yaw* são realizados por mecanismos de 4 barras, os quais controlam ambos globos oculares simultaneamente. Suas pálpebras contam com apenas 1 DoF, de modo que as 4 são operadas em conjunto ao abrir ou fechar. Isso pode limitar a amplitude de expressões, visto que esse rosto não é capaz de piscar com apenas um olho, por exemplo. Também observa-se a ausência de sobrancelhas, elemento comum em faces animatrônicas e que influenciam na demonstração de emoções.

Figura 16: Cabeça robótica Open.



Fonte: Adaptado de Nguyen Khac et al., 2022.

2.2.4.8 Plataforma Adam

Adam é uma cabeça robótica capaz de realizar gestos e de demonstrar expressões faciais, a qual foi desenvolvida para aplicações em IHR. Esse robô também conta com processamento de áudio integrado à inteligência artificial, o que possibilita o uso de linguagem natural durante a conversação (Al Kork, 2024).

O pescoço de Adam conta com 2 DoF, de modo que a cabeça possui amplitude angular de 60° no sentido vertical e de 100° no sentido horizontal. Para tal, a parte traseira da cabeça é conectada aos motores através de juntas esféricas, sendo 2 motores responsáveis pelos movimentos em *pitch* e 1 motor, que suporta a estrutura inteira, realiza a rotação em *yaw*. O mecanismo empregado consiste em hastes conectadas por juntas esféricas aos atuadores. Isso permite que o robô acene positiva ou negativamente de acordo com o teor da conversa.

A única peça móvel da carcaça do robô é a mandíbula. Essa é atuada através de 2 servo motores espelhados e possui apenas 1 DoF. Sua estrutura foi desenhada com base na anatomia humana, o que resulta em uma aparência próxima do natural. Além disso, seus movimentos são sincronizados com a fala, dando a impressão da capacidade de dialogar como um ser social. Assim como no pescoço, o emprego de motores inversos simultâneos necessita que seu controle seja de alta precisão, pois é comum que hajam mínimas diferenças entre os atuadores, o que pode resultar erros de funcionamento e danos aos mecanismos.

Seus olhos são controlados de forma independente em ambos movimentos de *pitch* e de *yaw*. O mecanismo de controle desses elementos é similar ao projeto⁸ de Cogley (Cogley, 2019), em que também são utilizadas juntas esféricas como os demais sistemas do rosto de Adam. Embora esse modelo permita que a amplitude de ação dos globos oculares seja semelhante à dos humanos, ele é constituído por muitas peças pequenas e pontos de encaixe. Por essas características, o mecanismo requer alta precisão tanto na fabricação quanto na montagem das peças. Isso pode dificultar a replicação do projeto, bem como torná-lo suscetível a falhas.

Ademais, a terceira peça que compõem a estrutura externa de Adam, apresenta nariz e orelhas de forma estática, essa também conta com as aberturas dos globos oculares menores do que as pupilas. Além desses elementos, há um orifício no centro da testa onde a câmera está posicionada. Também nota-se a ausência de pálpebras, de modo que o robô aparenta constantemente estar de olhos abertos. Esses aspectos podem causar sentimentos de estranheza durante interações sociais.

⁸Repositório Notion do projeto de mecanismo de olhos do Will Cogley: <https://willcogley.notion.site/Will-Cogley-Project-Archive-75a4864d73ab4361ab26cabaadaec33a?p=feel29fa32a443749f88524f53352f5a&pm=c>

Figura 17: Plataforma da cabeça robótica Adam.



Fonte: Al Kork, 2024.

2.2.4.9 Jubileo

Jubileo é o nome dado à cabeça de DoRIS, versão anterior do robô BORIS, apresentado na Figura 18. Esse projeto *open source* abrange uma face animatrônica e uma simulação virtual, as quais foram desenvolvidas com o foco em pesquisas de IHR. O modelo físico possui aparência amigável e, integrado ao robô de serviço DoRIS, é capaz de demonstrar expressões faciais e de regular sua voz conforme a reação do usuário (Bottega et al., 2022).

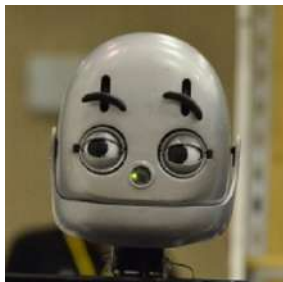
As suas sobrancelhas contam com 2 DoF, de modo que elas podem ser deslocadas verticalmente e rotacionar no próprio eixo. Elas são acopladas diretamente ao eixo dos servo motores com um parafuso, a longo prazo isso pode gerar folgas no sistema e desgastes no atuador. Isso também pode ocasionar no posicionamento impreciso das sobrancelhas.

Esse rosto possui um maxilar com 1 DoF, de modo que seu movimento de abertura e fechamento da boca é sincronizado com a fala do robô. Isso atribui a DoRIS a capacidade de fala como um ser social, e não apenas um auto falante reproduzidor de sons.

Suas 4 pálpebras são movidas de forma independente entre si, cada uma acionada por um servo motor. Isso proporciona a DoRIS a capacidade de piscar de forma orgânica e de realizar gestos assimétricos. Embora esse sistema gere em uma aparência antropomórfica de abertura e fechamento dos olhos, o uso de hastes moldadas a partir de cliques de papel resulta em instabilidades no mecanismo.

Os olhos podem ser rotacionados de forma independente em *pitch* e em conjunto em *yaw*. Seu mecanismo consiste no encaixe dos globos oculares em eixos esféricos, entre os quais era necessário a aplicação de uma pasta viscosa para reduzir o atrito entre as peças. Assim como o sistema de pálpebras, são utilizados cliques de papel adaptados para conectar as partes aos motores. Como as hastes eram apenas posicionadas nos pontos estratégicos, frequentemente as peças desencaixam-se dos motores, além disso, era comum que o material deformasse em curto períodos de atuação.

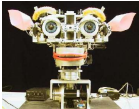


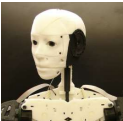





Figura 18: Face animatrônica Jubileo.



Fonte: Bottega et al., 2022.

A Tabela 1 apresenta os dados relevantes dos rostos descritos nesse trabalho. Através dessas informações, nota-se que em 15 anos de evolução há um aspecto em comum a todos os modelos: os olhos. A amplitude angular e a quantidade de DoFs variam entre os modelos, entretanto, a presença de globos oculares com mobilidade em *pitch* e *yaw* é recorrente entre eles. Isso reforça a ideia de que os olhos são o principal elemento na comunicação não-verbal. A boca também se faz presente nos robôs analisados, alguns utilizam como recurso auxiliar nas expressões faciais, mas em geral ela representa a capacidade de fala. Outros pontos como pálpebras e sobrancelhas, embora presentes na maioria dos rostos animatrônicos, apresentam diferenças entre os modelos descritos.

Tabela 1: Principais características dos rostos robóticos descritos nesse trabalho.

Imagem	Nome	Referência	Elementos móveis	DoF	Comercial	Open Source	Estrutura	Ano
	Kismet	9	olhos sobrancelhas boca orelhas	3 4 5 4	×	×	Exposto	1998
	KOBian	10	olhos pálpebras sobrancelhas boca	3 5 8 8	×	×	Coberto	2007
	Muecas	11	olhos sobrancelhas boca	3 4 1	×	×	Exposto	2014
	InMoov	12	olhos boca	2 1	✓	✓	Coberto	2014
	Eva 2.0	13	olhos pálpebras músculos faciais	6 2 10	✓	✓	Parcialmente Coberto	2020
	MARKO	14	olhos pálpebras sobrancelhas boca	3 2 0 0	×	×	Coberto	2022
	Open	15	olhos pálpebras boca	3 1 9	×	×	Exposto	2022
	Jubileo	16	olhos pálpebras sobrancelhas boca	3 4 4 1	×	✓	Coberto	2022
	Adam	17	olhos boca	4 1	×	×	Coberto	2023

Fonte: Autoria própria, 2025

2.3 Conceitos técnicos aplicados à expressões faciais animatrônicas

A partir da análise dos rostos robóticos mecânicos descritos na Subseção 2.2.4, e do sistema atual de BORIS, foram considerados alguns pontos guias para o desenvolvimento desse trabalho. Esses são discutidos a seguir:

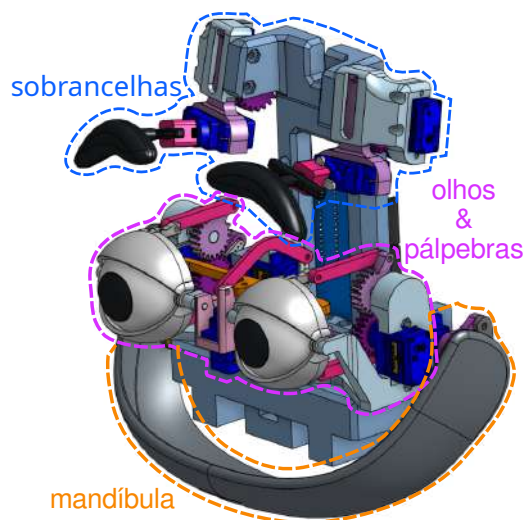
- Complexidade do modelo: notam-se que mecanismos de 4 ou 5 barras são amplamente aplicados em sistemas oculares, essas estruturas estão presentes nos robôs: MARKO, Eva 2.0 e Open. Esse tipo de acionamento pode ser de difícil manutenção e também é espaçoso. Outros modelos como o de Adam e Jubileo, são mais compactos, entretanto, apresentam menor amplitude que a anatomia humana. Assim, objetivou-se desenvolver um mecanismo de tamanho compatível com o rosto de BORIS, facilmente replicável e que fosse capaz de simular movimentos dos olhos de maneira natural;
- Material: alguns robôs, como Kismet e Muecas apresentam estruturas metálicas, o que torna difícil a realização de ajustes e substituição de peças. Além disso suas massas são mais elevadas que outros modelos que são compostos por materiais mais leves. Essa vantagem é observada em robôs como Eva 2.0, Open, Adam e até mesmo em BORIS. Assim, preferiu-se utilizar polímeros de maior leveza;
- Tamanho dos olhos: conforme comentado na Subseção 2.1.2, esses são os principais elementos na comunicação não-verbal. Observa-se que estão presentes em todos os rostos listados na Tabela 1, com estilos e graus de liberdade variados. De acordo com (Juan Olvido Perea-García e Kret, 2024), faces que apresentam olhos grandes e pupilas dilatadas costumam ser mais atraentes do que os demais.

Nota-se que robôs como Kismet e Jubileo tendem a ser mais simpáticos que outros com globos oculares menos visíveis, como InMoov e Eva 2.0. Em comparação com BORIS, percebe-se que sua versão anterior, Jubileo, apresentava uma proporção olho-pupila mais adequada às dimensões do rosto. Assim, o desenho dos olhos desse trabalho foi feito com o foco em atingir o grau de simpatia maior ou igual ao de Jubileo (Bottega et al., 2022).

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como base o modelo atual do rosto de BORIS, o qual é uma versão adaptada do projeto Jubileo (Bottega et al., 2022). Pretende-se estudar pontos de melhoria dos conjuntos de olhos e pálpebras, realçado em rosa na Figura 19. A partir dessa análise propõem-se o desenvolvimento de um modelo robusto que integre ambos sistemas.

Figura 19: Sistema interno do rosto de BORIS.



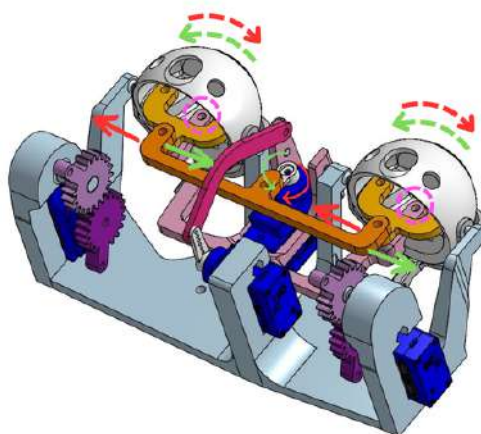
Fonte: Autoria própria, 2025

3.1 Sistema horizontal de BORIS

O sistema horizontal ocular, é dado pela movimentação indireta dos globos oculares, como mostra a Figura 20. A rotação do servo motor no sentido horário (setas vermelhas) faz com que a peça laranja seja deslocada para esquerda e mova os olhos para direção oposta, indicado pelas setas tracejadas. Observa-se que os eixos centrais de ambos os olhos (circulados em rosa) são conectados à peça rosa, de modo que eles são dependentes entre si. Isso gera uma limitação de movimentos, devido à extensão das peças para integrar

as partes e o espaço reduzido interno aos olhos. Além disso, essa configuração não permite realizar gestos de abdução e adução, como olhar em direção ao nariz, por exemplo (Penčić et al., 2022).

Figura 20: Diagrama do movimento horizontal ocular.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.2 Sistema vertical de BORIS

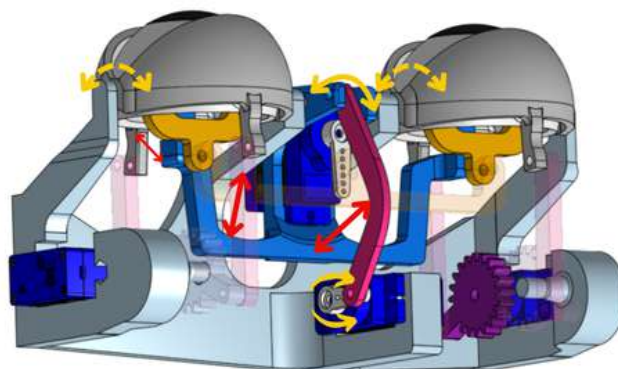
Como mencionado, a extensão angular no eixo *pitch* é em torno de 75° , entretanto o sistema mecanismo atual conta com um range de apenas 30° . Assim como no movimento horizontal, a atuação vertical também é conjunta, como na Figura 21, em que a base azul, onde ambos os olhos estão interligados, é conectada à haste rosa a qual é movida pelo servo motor. A limitação do movimento é evidenciada pelas setas em vermelho, que indicam os pontos de contato entre as peças do sistema.

Assim, propôs-se que o modelo desenvolvido nesse trabalho fosse capaz de realizar movimentos mais amplos e de forma mais robusta, em comparação aos sistemas de BORIS. Para isso, considerou-se a amplitude do movimento humano como parâmetro de referência, sendo aproximadamente 90° de rotação em *yaw* e 75° em *pitch*. Com a capacidade angular igual ou superior a do olho humano, é possível realizar expressões de forma análoga à natural. Embora tenha-se a movimentação similar à humana, estima-se que pelo estilo caricato e o material do modelo seja possível evitar o Vale da Estranheza.

3.3 Modelagem e Prototipagem 3D

Para modelagem 3D do protótipo foi utilizado o *software* Onshape®. Escolhido pela sua facilidade de uso e também é a ferramenta na qual foi desenhado o modelo facial atual.

Figura 21: Diagrama do movimento vertical ocular.

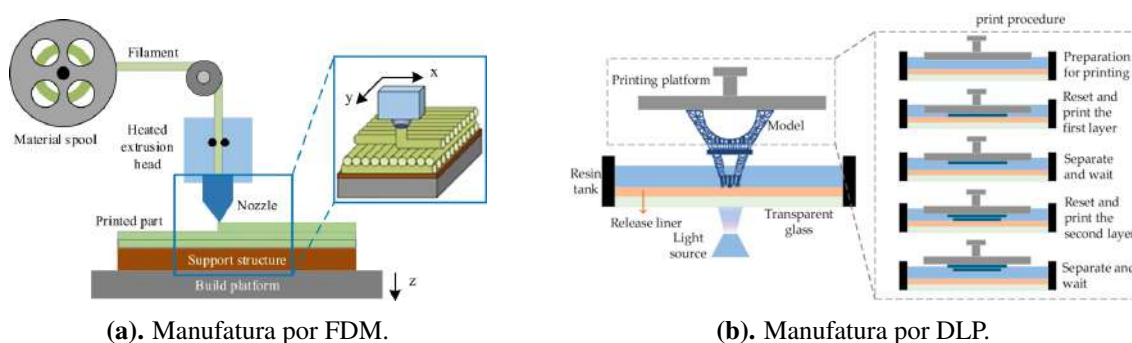


Fonte: Autoria própria, 2025

Por ser um sistema Cloud-native CAD, é possível acessar seu repositório de documentos e recursos via navegador *web*, além disso, permite múltiplos colaboradores em cada projeto e possui licença gratuita para estudantes.

A produção das peças foi realizada por impressão 3D. Foram testados dois métodos de manufatura aditiva: modelagem de fusão por deposição (FDM - Fused Deposition Modeling) e processamento digital de luz (DLP - Digital Light Processing), (Volpato, 2017). O primeiro consiste na extrusão de termoplásticos em camadas (Figura 22a)), nesse caso o material utilizado é o ácido polilático (PLA - Polylactic Acid). O processo por DLP é dado através da deposição de fotopolímeros em uma cuba, a qual recebe a projeção da imagem a ser curada, para esse empregou-se resina dentária (Figura 22b)).

Figura 22: Diagrama dos processos de manufatura FDM e DLP.



(a). Manufatura por FDM.

Fonte: Tamir et al., 2022.

(b). Manufatura por DLP.

Fonte: Nadda, Singh e Das, 2024.

3.4 Sistema ABENICS

A partir da análise do conjunto ocular atual, propõe-se elaborar um mecanismo individual para cada olho. Assim, um dos estudos que se mostrou relevante em relação ao movimento orbital é o modelo ABENICS (Abe, K. Tadakuma e R. Tadakuma, 2021). Este consiste em um sistema de rotação de 3 DoF, composto por uma engrenagem esférica associada à duas engrenagens monopolares, Figura 7. A esfera é acoplada a um suporte fixo, e as demais engrenagens são conectadas aos motores, o formato dessas possibilita o movimento similar ao de engrenagens retas. Além disso, permite que a engrenagem esférica deslize de forma passiva entre as outras.

Observa-se que esse modelo é análogo ao olho humano, entretanto, estima-se que o grau de complexidade esteja acima do necessário para emular o movimento ocular. Assim, planeja-se adaptar o mecanismo ABENICS para dois DoF. Além de simplificar o sistema, considera-se que a remoção de um eixo também possibilita a construção de um modelo compacto.

3.5 Sistema *Snake Robot*

A fim de adequar às dimensões dos módulos do HITSZ-Snakebot II ao modelo de olhos de BORIS, optou-se por substituir os servo motores por micro motores de passo¹. Seu tamanho diminuto e massa reduzida, tornam esse atuador adequado para essa aplicação. Além disso, a fabricação das peças por impressão 3D contribuiu na leveza do sistema.

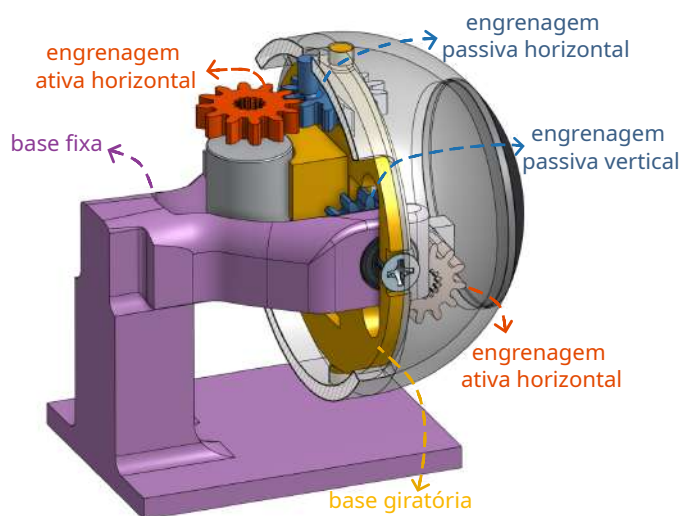
Em paralelo às correções da versão 2 do modelo ABENICS, foi projetado um modelo baseado no mecanismo do HITSZ-Snakebot II, cujo diagrama é apresentado na Figura 23. Esse sistema é composto por: uma base giratória, a qual representa o eixo de rotação em *yaw* e sustenta os 2 micro motores de passo; uma base fixa, que comporta os rolamentos para o movimento em *pitch*. Esse mecanismo funciona através de dois sistemas de engrenagem:

- Vertical: esse conta com uma relação de 1:2.5 entre as engrenagens, de modo que a passiva está centralizada verticalmente à esfera, e o motor está posicionado na face frontal da base giratória;
- Horizontal: por questões de espaço, manteve-se relação 1:1 para esse sistema, em que o atuador está fixado na parte traseira da base giratória e a engrenagem passiva

¹Website em que se adquiriu os motores: <https://www.usinainfo.com.br/motor-de-passo/micro-motor-de-passo-5v-10x10mm-eixo-15mm-5836.html>

é encaixada diretamente em um orifício da esfera. Para que não houvesse sobreposição das partes, a peça amarela possui uma fenda na altura do eixo do motor.

Figura 23: Diagrama do modelo 3D do sistema projetado, com um corte parcial do olho no plano frontal.

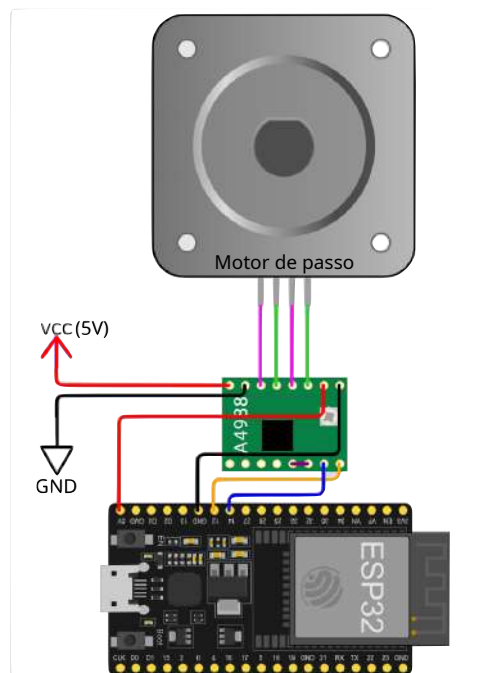


Fonte: Autoria própria, 2025.

3.6 Circuito

Conforme mencionado, os atuadores escolhidos para o mecanismos baseado em *snake robot* foram micro motores de passo. Para controlá-los optou-se pelo microcontrolador ESP32 em conjunto com *driver* A4988. O diagrama do circuito elaborado é apresentado na Figura 24.

Figura 24: Diagrama do circuito de controle dos micro motores de passo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.6.1 Micro motor de passo

O atuador selecionado para esse projeto é um micro motor de passo, mostrado na Figura 25. O principal motivo da escolha desse modelo foi pelo seu tamanho compacto (10X16X13mm), e também pela sua massa de 4,6g, (UsinaInfo, 2025). Sua tensão de operação é de 5V, o que é ideal nesse caso. Além disso ele é capaz de rotacionar em sentido horário e anti-horário e sua velocidade é controlável através dos pulsos.

Figura 25: Micro motor de passo escolhido.



Fonte: (UsinaInfo, 2025).

3.6.2 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador que possui duas CPUs: de protocolo e de aplicação, as quais são responsáveis pelo processamento de dados, e possui alta capacidade de memória ((ESP32: *Technical Reference Manual* 2025)). Esse sistema embarcado dispõe de módulos Wi-Fi e Bluetooth integrados, e também é de baixo custo. Essas foram as principais características que levaram à escolha desse modelo, apresentado na Figura 26.

Figura 26: Microcontrolador ESP32.



Fonte: *ESP32: Technical Reference Manual*, 2025.

3.6.3 Driver A4988

O *driver* de motor de passo A4988 é próprio para acionar motores bipolares, Figura 27. Sua tensão de saída pode ser de até 35V, e a de nível lógico é na faixa de 3.3V a 5V, compatível com o microcontrolador escolhido. Ele possui 5 modos de operação: de 1 até 1/16 passos de incremento, (*A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection* 2022). Isso possibilita que o controle do sistema seja preciso, de modo a resultar em movimentos suaves e de aparência natural.

Figura 27: Módulo Driver de motor A4988.



Fonte: *A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection*, 2022.

4 RESULTADOS

A presente seção trata dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desse trabalho. A partir dos experimentos realizados observou-se a necessidade de investigar sistemas além do modelo ABENICS. Com isso, considerou-se que o mecanismo baseado em *snake robots* poderia ser mais vantajoso, por ser compacto e relativamente mais simples de ser adaptado. Assim, são discutidos os resultados obtidos com cada modelo.

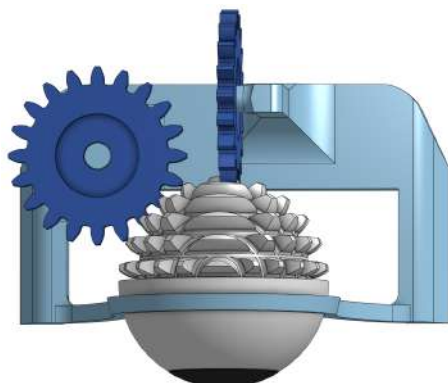
4.1 Modelo baseado em ABENICS

Inicialmente modelou-se um sistema baseado no modelo ABENICS simplificado, com 2 DoF: rotação nos eixos *pitch* e *yaw*. A primeira versão foi estruturada com duas engrenagens cilíndricas retas e uma engrenagem esférica, cujo suporte é um aro preso à base dos eixos das demais. A Figura 28 apresenta esse sistema, no qual percebeu-se que as peças não encaixam na mesma posição do desenho devido à dilatação do material durante o processo de manufatura. Assim, fez-se ajustes na margem de contato entre as partes, e obteve-se o modelo físico equivalente ao desenho 3D.

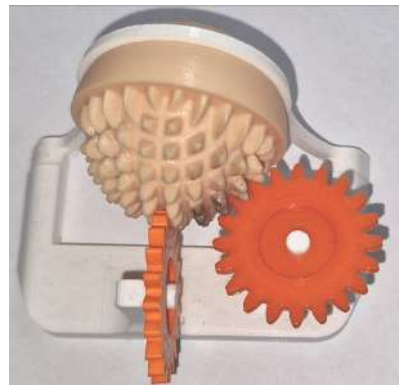
A partir desse primeiro protótipo, notam-se alguns pontos de correção: há uma certa resistência no deslize da esfera e seu eixo, resultante das características do plástico, acredita-se que ao revestir a base de rotação o movimento será suavizado. Também foi percebido que o olho desloca-se do centro. Para remediar isso, adicionou-se uma terceira engrenagem passiva, para manter a esfera na posição correta, como apresenta a Figura 29. Além disso, observou-se que essa base é frágil, de forma que para garantir estabilidade seria necessário aumentar a espessura, de modo que a seção visível do olho seria muito pequena.

Em paralelo, testou-se imprimir a esfera em diferentes maneiras, tendo em vista que o modelo em PLA (Fig. 30 (a)), fabricado em uma 3D Creality® Ender-3, apresentou saliências nos dentes. Pela qualidade de impressão mais elevada, produziu-se outra esfera em uma 3D A1 BambuLab® (Fig. 30 (b)), cujos dentes continham menos rebarbas, ainda assim havia resistência entre as partes. A terceira esfera (Fig. 30 (c)) foi impressa

Figura 28: Versão 1 do protótipo de modelo ABENICS.



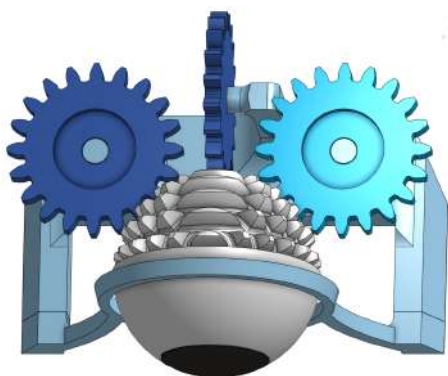
(a). Modelo 3D da versão 1



(b). Protótipo físico da versão 1

Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 29: Versão 2 do protótipo de modelo ABENICS.



(a). Modelo 3D da versão 2



(b). Protótipo físico da versão 2

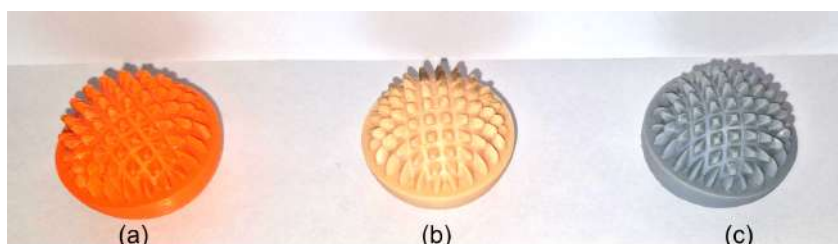
Fonte: Autoria própria, 2025.

em resina em uma 3D Creality® HALO-MAGE PRO, a qual apresentou falhas ínfimas. Apesar de ter obtido uma impressão adequada, a peça em resina se mostrou pesada para o sistema em questão, de modo que não notou-se melhoria nas falhas observadas.

Como alternativa a esse modelo de aro, considerou-se a substituir desse eixo por um molde de acetato transparente, o qual sustentaria o olho com maior área de contato sem ocultá-lo. Outro ajuste realizado foi o posicionamento das engrenagens: percebeu-se que um dos motivos pelos quais a esfera deslocava-se de forma errônea era devido à engrenagem do eixo *yaw* não estar centralizada horizontalmente e à do eixo *pitch* estar desalinhada ao centro vertical.

Para que não houvesse sobreposição entre as engrenagens elas devem ser deslocadas em relação ao eixo oposto de atuação. Como pode ser observado na Figura 31, o centro da

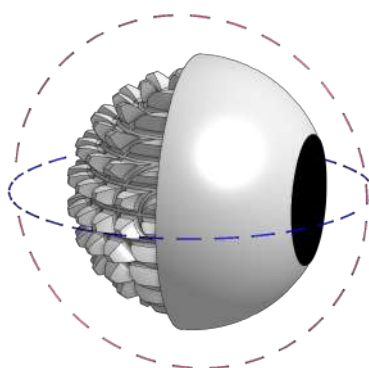
Figura 30: Comparação entre a qualidade de impressão das esferas: a) Fabricada em PLA em uma 3D Creality® Ender-3, baixa qualidade. b) Fabricada em PLA em uma 3D A1 BambuLab®, alta qualidade, mas ainda havia atrito. c) Fabricada em resina dental em uma 3D Creality® HALO-MAGE PRO, excelente qualidade, porém sua massa elevada resultou em travamentos.



Fonte: Autoria própria, 2025

engrenagem vertical deve estar alinhado à circunferência em rosa, enquanto a engrenagem horizontal deve estar centralizada com o tracejado em azul, de modo a garantir o encaixe com os dentes da esfera passiva. Pela limitação de tamanho do sistema, optou-se por adicionar outras engrenagens, sem redução, aos eixos dos motores, para que esses fiquem espaçados das demais peças.

Figura 31: Circunferências em que as engrenagens devem ser centralizadas, sendo a azul para o eixo vertical e a rosa para o eixo horizontal.



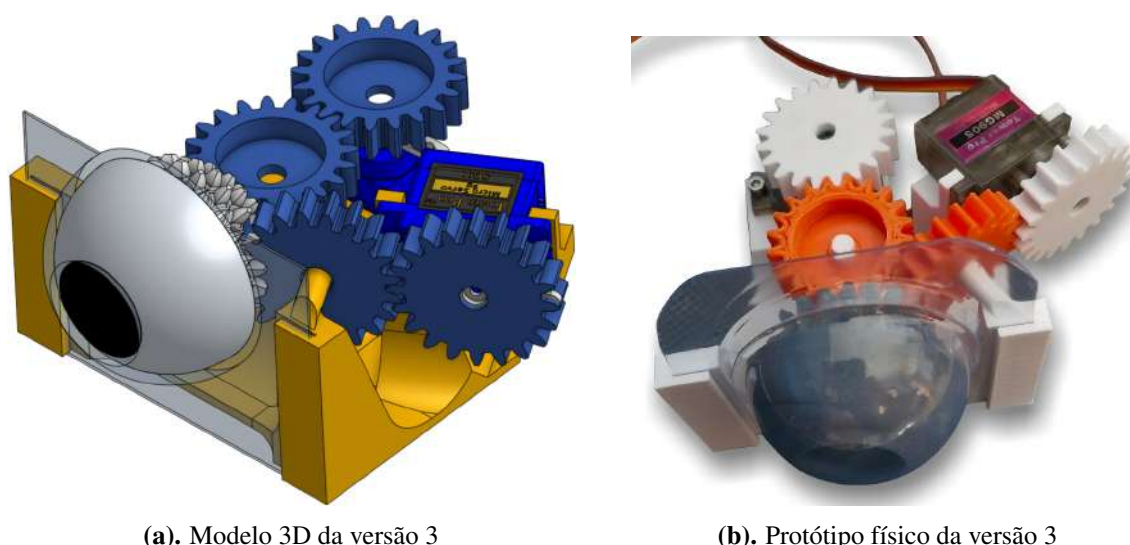
Fonte: Autoria própria, 2025.

A Figura 32 apresenta a versão 3 do sistema, a qual conta com uma forma côncava de acetato como eixo de rotação da esfera. Nessa, foram ajustadas as posições de ambas engrenagens, também foram adicionados os servo motores e as demais engrenagens. Nota-se que com esse modelo o globo não desprendesse do eixo, ponto positivo em relação às versões anterior. Entretanto, os movimentos resultantes divergiram do esperado.

Acredita-se que uma das causas das imperfeições é devido ao molde de acetato utilizado. Pois esse segue um padrão comercial, de modo que há uma diferença considerável

entre o tamanho disponível mais próximo e o diâmetro da esfera. Além disso, esse suporte é deformado se for aplicada demasiada pressão, o que gera desencontro entre as engrenagens. Também observou-se um travamento entre os dentes do globo ocular e da engrenagem vertical, isso impedia a movimentação do sistema por completo e às vezes ocasionava do desacoplamento das engrenagens. A fim de corrigir isso, testou-se modificar o desenho e a qualidade de impressão da engrenagem cilíndrica, entretanto não foi obtido sucesso. Válido constatar que experimentou-se em ambas versões 2 e 3 o uso do modelo de esfera fabricado de forma oca em resina dentária, o qual apresentou menor massa e alta qualidade de impressão.

Figura 32: Versão 3 do protótipo de modelo ABENICS.



(a). Modelo 3D da versão 3

(b). Protótipo físico da versão 3

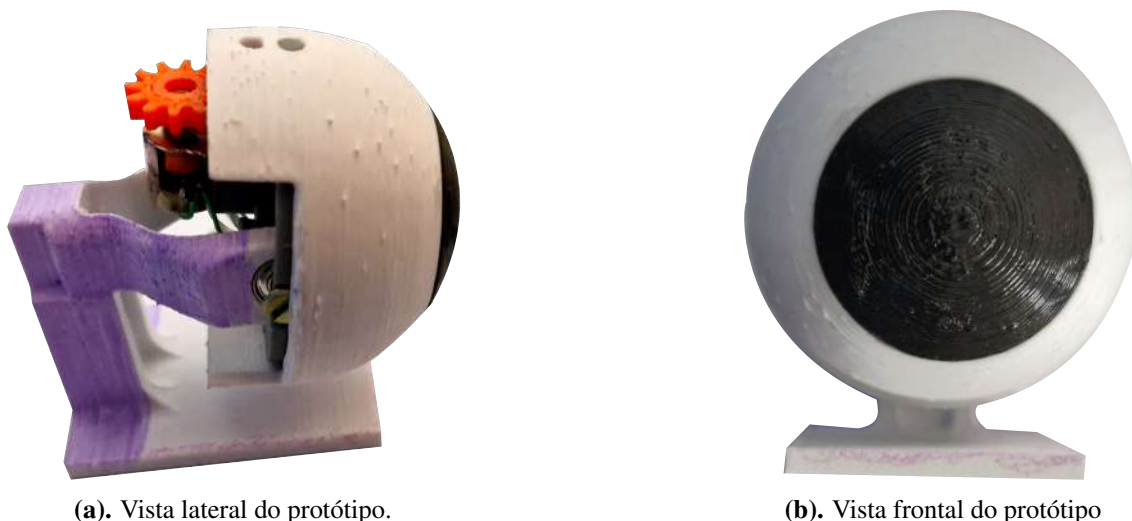
Fonte: Autoria própria, 2025.

4.2 Modelo baseado em *Snake Robot*

O mecanismo baseado em *snake robots* foi projetado em paralelo à versão 3 do modelo adaptado de ABENICS. A partir dos protótipos iniciais, verificou-se que esse sistema apresentou melhor funcionamento que os demais. Como resultados, obteve-se uma amplitude de aproximadamente 73° em *yaw* e de 95° em *pitch*. Os micro motores de passo de fato supriram as necessidades desse trabalho. O protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 33.

Em comparação com as versões anteriores, considerou-se que esse modelo se adequa melhor na aplicação de olhos animatrônicos. Entretanto, foram enfrentados alguns desafios na construção do sistema. Foi necessário adaptar o mecanismo original para um tamanho proporcional às dimensões do globo ocular. Embora os motores escolhidos fossem

Figura 33: Protótipo físico do modelo baseado em *snake robot*.



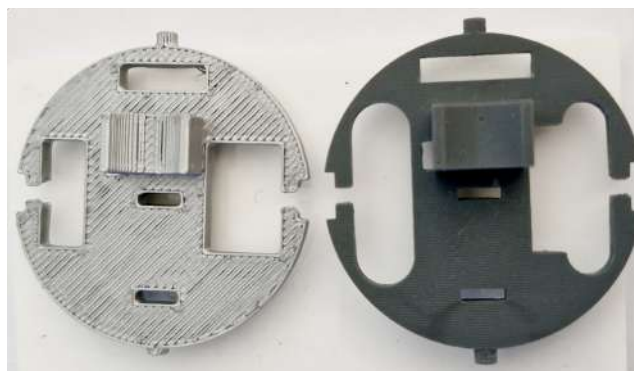
Fonte: Autoria própria, 2025.

de porte reduzido, encontrou-se dificuldade em acomodar os componentes internamente à esfera.

Realizaram-se alguns ajustes no desenho da base fixa, reduzir o espaço de sobreposição com olho ao ser rotacionado em *yaw*. Além disso, a fabricação das peças demandou atenção, tendo em vista seu tamanho reduzido. As engrenagens foram produzidas pelo processo de FDM em alta qualidade em PLA.

Inicialmente a base giratórias foi feita em uma impressora 3D Creality® K1, porém, devido aos seus eixos cilíndricos serem muito pequenos, notou-se uma deformidade resultante da manufatura por FDM. Assim, considerou-se que a impressão por DLP seria mais adequada nesse caso, então experimentou-se produzir essa peça em resina dental. A Figura 34 apresenta as duas versões dessa estrutura. Embora o modelo impresso em resina (direita) já tivesse algumas atualizações de desenho, as partes cilíndricas não foram alteradas. Desse modo, é válido analisar comparativamente as duas versões dessa peça nesse ponto crítico. A base fixa, o globo ocular e a pupila, foram as partes menos complicadas, dado que são as maiores desse sistema.

Figura 34: Comparação entre a base giratória impressa em PLA (esquerda) e a mesma peça fabricada em resina dentária (direita).



Fonte: Autoria própria, 2025.

Apesar das dificuldades encontradas na construção desse modelo, observou-se que os movimentos obtidos com o sistema baseado em *snake robot* são mais próximos do natural humano, em comparação ao ABENICS. Além disso, esse protótipo é mais estável e compacto do que as versões iniciais e até mesmo em relação ao de BORIS. Dessa forma, considera-se que esse modelo cumpre com as expectativas propostas de um sistema de olho animatrônico.

4.3 Discussão dos resultados

As versões iniciais eram baseadas no mecanismo ABENICS, as quais consistiram em uma engrenagem esférica (como globo ocular) e duas engrenagens cilíndricas retas responsáveis pelas rotações em *pitch* e *yaw*. Foram experimentados 3 protótipos referentes a esse mecanismo, os quais apresentaram movimentos resultantes incoerentes com o esperado. Embora a versão 3 contasse com as correções das principais falhas das demais, observaram-se outras imperfeições.

Ao analisar o mecanismo ABENICS original, nota-se que o eixo com maior amplitude de movimento é em *roll*, enquanto em *pitch* e *yaw* tem-se limitações estruturais. Dessa forma, considerou-se que adaptar esse sistema para 2 DoF (*pitch* e *yaw*) apresenta alto nível de complexidade, e demanda mais tempo do que o disponível. Com isso, estudou-se um sistema mecânico baseado em *snake robot*, especificamente o robô HITSZ-Snakebot II. Para esse, também foram necessários ajustes para que seu tamanho fosse adequado à aplicação proposta. As vantagens observadas nesse modelo em relação ao ABENICS são:

- Mecanismo compacto: o sistema de engrenagens e motores são internos aos olhos, além disso sua massa é aproximadamente 54% menor que a do modelo baseado em ABENICS;

- Estabilidade: a estrutura que suporta a esfera é mais resistente e precisa;
- Movimento antropomórfico: esse protótipo apresenta aproximadamente 73° de amplitude em *yaw* e 95° em *pitch*, embora o movimento horizontal seja reduzido em comparação com o humano, é mais próximo do que o resultado das versões iniciais;
- Reprodutibilidade: esse modelo é mais simples de ser replicado, em vista de que os componentes estruturais possuem menor complexidade em comparação com as outras versões.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta como resultado um protótipo de um sistema ocular animatrônico. Para tal, foram estudados dois mecanismos principais: ABENICS e *snake robot*, de forma integrada à aplicação de modelagem e impressão 3D. Além disso, também foram analisados modelos de rostos robóticos presentes na literatura. Com isso, obteve-se um mecanismo que supre as falhas do modelo ocular de BORIS, de forma compacta e acessível. Assim, conclui-se que o trabalho atende o objetivo proposto de refatorar um sistema animatrônico de olhos.

5.0.1 Trabalhos futuros

Com os resultados alcançados neste trabalho, observa-se a possibilidade de desenvolvimento futuro em aspectos relacionados ao protótipo. Sendo os principais pontos de seguimento desse projeto:

- Integrar sistema ocular ao rosto animatrônico: a fim de atestar a robustez do mecanismo desenvolvido, pretende-se incorporar os olhos com os demais elementos da face de BORIS: pálpebras, sobrancelhas e maxilar;
- Desenvolver estudos comparativos: a partir dos resultados obtidos nesse trabalho, estima-se que podem ser realizadas análises de validação entre os modelos apresentados. Também considera-se que esse projeto pode contribuir em análises qualitativas na área de robótica social;
- Realizar pesquisas qualitativas: com esse projeto também é possível explorar os impactos do rosto animatrônico em um robô de serviço. De forma a contribuir com o desenvolvimento na área de robótica social.

BIBLIOGRAFIA

- A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection* (2022). Allegro MicroSystems. URL: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/a4988-datasheet.pdf>.
- Abe, Kazuki, Kenjiro Tadakuma e Riichiro Tadakuma (2021). “ABENICS: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings”. Em: *IEEE Transactions on Robotics* 37.5, pp. 1806–1825. DOI: 10.1109/TRO.2021.3070124.
- Al Kork, Samer (mai. de 2024). “Design and Implementation of Adam: A Humanoid Robotic Head with Social Interaction Capabilities”. Em: *Applied Research and Innovation* 7, p. 13.
- Al Moubayed, Samer et al. (2012). “Furhat: A Back-Projected Human-Like Robot Head for Multiparty Human-Machine Interaction”. Em: *Cognitive Behavioural Systems*. Ed. por Anna Esposito et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 114–130.
- Altounian, Sebastien et al. (nov. de 2023). *LyonTech, Team Description Paper RoboCup@Home 2024 Open Platform League*.
- Bottega, Jair A. et al. (2022). *Jubileo: An Open-Source Robot and Framework for Research in Human-Robot Social Interaction*. DOI: 10.48550/ARXIV.2209.13509.
- Breazeal, Cynthia (mai. de 2002). *Designing Sociable Robots*. The MIT Press. ISBN: 978-0-262-52431-5. DOI: 10.7551/mitpress/2376.001.0001.
- Broadbent, Elizabeth et al. (ago. de 2013). “Robots with Display Screens: A Robot with a More Humanlike Face Display Is Perceived To Have More Mind and a Better Personality”. Em: *PloS one* 8, e72589. DOI: 10.1371/journal.pone.0072589.
- Chen, Boyuan et al. (2021). “Smile Like You Mean It: Driving Animatronic Robotic Face with Learned Models”. Em: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2739–2746. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560797.
- Cicero, Marcus Tullius (1927). *Tusculanae Disputationes (Disputas Tusculanas)*. Trad. por J. E. King. Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Cid, Felipe et al. (2014). “Muecas: A Multi-Sensor Robotic Head for Affective Human Robot Interaction and Imitation”. Em: *Sensors* 14.5, pp. 7711–7737. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s140507711.
- Cogley, Will (2019). *Intermediate Eye Mechanism*. URL: <https://willcogley.notion.site/Will-Cogley-Project-Archive-75a4864d73ab4361ab26cabaadaec33a?p=feel29fa32a443749f88524f53702f5a&pm=c> (acesso em 20/01/2025).
- Ekman, Paul, Wallace V. Friesen e Phoebe C. Ellsworth (1972). “Emotion in the Human Face: Guidelines for Research and an Integration of Findings”. Em: URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:141855078>.
- ESP32: Technical Reference Manual* (jan. de 2025). Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.
- Faraj, Zanzwar et al. (2021). “Facially expressive humanoid robotic face”. Em: *HardwareX* 9, e00117. ISSN: 2468-0672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00117>.
- Glas, Dylan F. et al. (2016). “ERICA: The ERATO Intelligent Conversational Android”. Em: *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pp. 22–29.
- Juan Olvido Perea-García Daisy Berris, Jingzhi Tan e Mariska E. Kret (2024). “Pupil size and iris brightness interact to affect prosocial behaviour and affective responses”. Em: *Cognition and Emotion* 0.0. PMID: 39540646, pp. 1–16. DOI: 10.1080/02699931.2024.2427340. URL: <https://doi.org/10.1080/02699931.2024.2427340>.
- Kishi, Tatsuhiro et al. (2013). “Development of a Head for Bipedal Humanoid Robot Capable of High Facial Expression Ability with Big Range of Movement of Facial Region and Facial Color”. Em: *Journal of the Robotics Society of Japan* 31.4, pp. 424–434. DOI: 10.7210/jrsj.31.424.
- Kunold, Laura, Nikolai Bock e Astrid Rosenthal-von der Pütten (2023). “Not All Robots are Evaluated Equally: The Impact of Morphological Features on Robots’ Assessment through Capability Attributions”. Em: *J. Hum.-Robot Interact.* 12.1. DOI: 10.1145/3549532. URL: <https://doi.org/10.1145/3549532>.
- Langevi, Gaël (2025). *InMoov—Open-Source 3D Printed Life-Size Robot*. URL: <https://inmoov.fr/> (acesso em 21/01/2025).
- Lemos, Joao F. S. S. et al. (nov. de 2023). *FBOT@Home Team Description Paper Robo-Cup@Home Eindhoven 2024*.

- Lütkebohle, Ingo et al. (2010). “The bielefeld anthropomorphic robot head “Flobi””. Em: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3384–3391. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509173.
- McGinn, Connor (jun. de 2019). “Why Do Robots Need a Head? The Role of Social Interfaces on Service Robots”. Em: *International Journal of Social Robotics* 12.1, pp. 281–295. DOI: 10.1007/s12369-019-00564-5.
- Metta, Giorgio et al. (2010). “The iCub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development”. Em: *Neural Networks* 23.8. Social Cognition: From Babies to Robots, pp. 1125–1134. ISSN: 0893-6080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2010.08.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608010001619>.
- Mori, Masahiro (1970). “The uncanny valley”. Em: *Energy* 7.4, pp. 33–35.
- Mu, Zonggao et al. (2017). “Two types of snake-like robots for complex environment exploration: Design, development, and experiment”. Em: *Advances in Mechanical Engineering* 9.9, p. 1687814017721854. DOI: 10.1177/1687814017721854.
- Muto, Toshitaka e Masaaki Kanazawa (1996). “Linear and angular measurements of the mandible during maximal mouth opening”. Em: *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 54.8, pp. 970–974. ISSN: 0278-2391. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0278-2391\(96\)90394-8](https://doi.org/10.1016/S0278-2391(96)90394-8).
- Nadda, Rahul, Prashant Kumar Singh e Diganta Bhusan Das (2024). “Revolutionizing microneedle array fabrication using additive manufacturing technologies: Potential applications and clinical translation”. Em: *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 101, p. 106288. ISSN: 1773-2247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.106288>.
- Nakaoka, Shin’ichiro et al. (2009). “Creating facial motions of Cybernetic Human HRP-4C”. Em: *2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 561–567.
- Nguyen Khac, Toan et al. (jan. de 2022). “Development of Humanoid Robot Head Based on FACS”. Em: *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, pp. 365–372. DOI: 10.18178/ijmerr.11.5.365-372.
- Nishio, Shuichi, Hiroshi Ishiguro e Norihiro Hagita (jun. de 2007). “Geminoid: Teleoperated Android of an Existing Person”. Em: I-Tech. ISBN: 978-3-902613-00-4. DOI: 10.5772/4876.
- Okada, Hiroyuki et al. (nov. de 2023). <https://athome.robocup.org/wp-content/uploads/OPL-Pumas-TDP2024.pdf>.

- Palmer, Colin J. e Colin W. G. Clifford (2020). “Face Pareidolia Recruits Mechanisms for Detecting Human Social Attention”. Em: *Psychological Science* 31.8, pp. 1001–1012. DOI: 10.1177/0956797620924814.
- Penčić, Marko et al. (abr. de 2022). “Anthropomorphic Robotic Eyes: Structural Design and Non-Verbal Communication Effectiveness”. Em: *Sensors* 22, pp. 3060-1–3060. DOI: 10.3390/s22083060.
- Preto, Roberta de Mendonça (2022). “Geração de Apresentações Oraís com expressividade emocional em um robô humanoide”. Em: *Manancial - Repositório Digital da UFSM*. Universidade Federal de Santa Maria.
- Reilink, Rob et al. (2011). “Mechatronic design of the Twente humanoid head”. Em: *Intelligent Service Robotics* 4, pp. 107–118. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:6506963>.
- Ribeiro, Tiago et al. (nov. de 2024). *LAR@Home 2025 Team Description Paper*.
- Rojas-Quintero, J.A. e M.C. Rodríguez-Liñán (2021). “A literature review of sensor heads for humanoid robots”. Em: *Robotics and Autonomous Systems* 143, p. 103834. ISSN: 0921-8890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103834>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889021001196>.
- Seeja, G., Arockia Selvakumar Arockia Doss e V. Berlin Hency (2022). “A Survey on Snake Robot Locomotion”. Em: *IEEE Access* 10, pp. 112100–112116. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215162.
- Seetohul, Jenna e Mahmood Shafiee (2022). “Snake Robots for Surgical Applications: A Review”. Em: *Robotics* 11.3. ISSN: 2218-6581. DOI: 10.3390/robotics11030057.
- Shrek 2* (2004). DreamWorks Animation. URL: https://www.primevideo.com/dp/amzn1.dv.gti.7eb0a83f-e142-e935-04c6-7793b2729dce?autoplay=0&ref_=atv_cf_strg_wb.
- Stroessner, Steven (jan. de 2020). “On the social perception of robots: measurement, moderation, and implications”. Em: Elsevier, pp. 21–47. ISBN: 9780128153673. DOI: 10.1016/B978-0-12-815367-3.00002-5.
- Tamir, Tariku Sinshaw et al. (2022). “A feedback-based print quality improving strategy for FDM 3D printing: an optimal design approach”. Em: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120.3, pp. 2777–2791. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08332-4>.
- UsinaInfo (2025). *Micro Motor de Passo 5V 10x10mm Eixo 1.5mm*. URL: <https://www.usinainfo.com.br/motor-de-passo/micro-motor-de-passo-5v-10x10mm-eixo-15mm-5836.html> (acesso em 25/01/2025).

- V. E. de Sousa, Cauan et al. (nov. de 2023). *RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home 2024: Eindhoven Edition*.
- Ven, P.A.J. van de (fev. de 2017). *Implementing EyePi architecture on R3D3*. URL: <http://essay.utwente.nl/72331/>.
- Volpato, Neri. (2017). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Editora Blucher, p. 147. ISBN: 9788521211518.