



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mafalda Campos Conde

**Projeto, construção e controlo de um
pescoço antropomórfico de um robô**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Mafalda Campos Conde

**Projeto, construção e controlo de um
pescoço antropomórfico de um robô**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor João Paulo Flores Fernandes

Professor Doutor Pedro Filipe Lima Marques

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela educação, pelos conselhos e pelo amor que me trouxeram a este ponto.

Ao pessoal do LAR que, desde o início, me acolheu de braços abertos e me auxiliou ao longo deste projeto. Em especial à Joana Coelho, que me guiou imensamente e sempre se disponibilizou para solucionar qualquer problema, ao Ricardo Remelgado e ao Marco Luís, pelas opiniões amigas e ajuda diária.

Ao Professor Filipe Marques, que se revelou um guia indispensável, encaminhando-me com críticas construtivas e sempre bom humor.

Aos meus amigos da Universidade, que me fizeram quem sou hoje e por todos os momentos passados. Ao Guilherme, que me acompanhou desde o início e me puxou para cima, mesmo nos momentos mais difíceis, mostrando-me que tudo é possível.

Para terminar, a todos os que de qualquer maneira contribuíram para a finalização deste projeto com conhecimento ou com a apenas um sorriso. Obrigada.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I declare that I acted with integrity elaborating the present academic work and confirm that I did not resort to plagiarism or any other form of misuse or falsification of information or results in any leading steps to its elaboration.

I further declare that I know and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho

Universidade do Minho, 31 de outubro de 2022

RESUMO

A população tem procurado sempre por meios de desenvolvimento de máquinas inteligentes para futuro emprego numa variedade de áreas e aplicações, o que levou a um tremendo avanço na área da robótica nos últimos anos.

Os robôs antropomórficos existem desde a segunda metade do século XX e apresentam-se como uma ótima solução em ambientes e tarefas que requerem a interação com o ser humano, como em fins educativos, de auxílio e entretenimento.

A presente dissertação apresenta como principal objetivo a construção e controlo de um pescoço antropomórfico para o robô CHARMIE (*Collaborative Healthcare/Home Assistance by Minho Industrial Electronics*), um robô a ser desenvolvido no LAR (Laboratório de Automação e Robótica da Universidade do Minho) que tem como função o auxílio da população mais velha em ambientes domésticos, de saúde e de instalações auxiliares. O pescoço deve ser capaz de se movimentar como um pescoço humano, detetando e rastreando objetos através de visão por computador.

Após uma introdução ao tema, é realizada a revisão bibliográfica dos conceitos relevantes para a execução do tema. De seguida, é abordado o projeto mecânico, onde são exibidos todos os requisitos iniciais, escolhido o mecanismo do pescoço, e modelado e construída a solução final. Devido a problemas de compatibilidade com o Arduino, o modelo do pescoço sofreu alterações em relação aos requisitos iniciais. Posteriormente à construção do pescoço, é desenvolvido o seu controlo. A cinemática direta e o seu espaço de trabalho são calculados e os algoritmos de visão por computador, utilizando *Python*, e Arduino são explicados, bem como a sua ligação. No final deste capítulo, são exibidos os testes experimentais realizados. Por fim, com o pescoço concluído, a solução final conseguida é avaliada em relação aos objetivos e requisitos iniciais propostos, apresentando os resultados e as suas conclusões.

Palavras-Chave

Robô Antropomórfico, Pescoço; Controlo; Visão por computador; Arduino

ABSTRACT

People have always been looking for ways to develop intelligent machines for further employment in a variety of areas and applications, which has led to a tremendous advance in robotics in recent years.

Anthropomorphic robots have been around since the second half of the 20th century and present an optimal solution in environments and tasks that require human interaction, such as education, assistance, and entertainment.

The main goal of this dissertation is the construction and control of CHARMIE's neck, an anthropomorphic robot, in LAR (Laboratory of Automation and Robotics of University of Minho). Its purpose is the assistance of elders in domestic, healthcare, and ancillary facilities settings. The neck must be able to move like a human neck, detecting and tracking objects through computer vision.

After an introduction, a bibliographic review of the concepts is carried out. Furthermore, the mechanical project of the neck is approached, the initial requirements are exhibited, the neck mechanism is chosen, and the final model is designed and built. Due to Arduino compatibility issues, the neck model had to be changed concerning its initial requirements. Next to its construction, the control of the neck is developed. Direct kinematics and the workspace of the neck are computed and the algorithms of computer vision, using python, and Arduino are explained. At the end of this chapter, the experimental tests were displayed. The final solution is evaluated using the initial goals and requirements, and the results and conclusions are presented.

Keywords

ANTHROPOMORPHIC ROBOT; NECK; CONTROL; COMPUTER VISION; ARDUINO

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas	x
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura de Dissertação	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Robôs Antropomórficos	5
2.2. Anatomia do Pescoço Humano.....	9
2.3. Pescoços Antropomórficos.....	13
2.4. Sistema de Controlo	21
3. Projeto Mecânico	29
3.1. Requisitos Iniciais.....	29
3.2. Modelo Conceptual	37
3.3. Construção do Pescoço.....	44
3.4. Conclusões do capítulo.....	49
4. Controlo do pescoço	50
4.1. Sistema de Coordenadas.....	51
4.2. Cinemática direta	52
4.3. Algoritmo de visão	56

4.4.	Arduíno	61
4.5.	Testes Experimentais	63
4.6.	Conclusões do capítulo.....	69
5.	Considerações finais	70
5.1.	Conclusões	70
5.2.	Perspetivas e Trabalhos Futuros	71
Apêndice I – Desenhos Técnicos de Apoio		72
Apêndice II – Algoritmos utilizados		78
Bibliografia		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fotos ilustrativas dos robôs antropomórficos WABOT-1 e WABOT-2	5
Figura 2.2 – Imagem representativa de Qrio	6
Figura 2.3 – Foto ilustrativa de ASIMO ao lado de uma pessoa	6
Figura 2.4 - Foto ilustrativa de WABIAN-2	7
Figura 2.5 – (a) Desenho conceptual de CHARMIE	8
Figura 2.6 – Representação anatômica das vértebras existentes no pescoço humano	9
Figura 2.7 – Graus de liberdade do pescoço humano	10
Figura 2.8 – Posições estáticas do pescoço	11
Figura 2.9 – Capacidade geradora de momento dos músculos do pescoço numa posição neutra	13
Figura 2.10- Posições do pescoço de Marko	17
Figura 2.11 – Comparação entre resultados de deteção de objetos	24
Figura 2.12 – Etapas do método de deteção de objetos utilizando visão por computador	24
Figura 2.13 - Resultado da utilização das ferramentas DrawContours, e FindContours	25
Figura 2.14 - resultado da utilização dos comandos <i>FindContours</i> , <i>drawContours</i> , <i>Moments</i> e <i>Circle</i>	26
Figura 2.15 - Arduino UNO	28
Figura 2.16 – Desenho esquemático de uma <i>Breadboard</i>	28
Figura 3.1 – Foto ilustrativa da Impressora <i>Markerbot Replicator 2</i>	33
Figura 3.2 – (a) Modelação da base do pescoço, encaixe para o servo que realiza o <i>yaw</i> , (b) Modelação do encaixe do servo DF15RMG na base e no disco rotativo	38
Figura 3.3 – Representação esquemática do encaixe da peça FR05-S101 no servo Dynamixel MX-64T	38
Figura 3.4 - Representação esquemática do encaixe da peça FR05-H101 no servo Dynamixel MX-64T	39
Figura 3.5 – (a) Modelação do encaixe inferior, furos centrais compatíveis com o disco rotativo da base; (b) Modelação do encaixe superior; (c) Modelação do encaixe superior e inferior no servo Dynamixel MX-64T	39

Figura 3.6 – (a) Modelação da parte frontal do suporte da câmara 3D D455 <i>Intel Realsense</i> ; (b) Modelação da tampa do suporte da câmara 3D D455 <i>Intel Realsense</i> com encaixe para os discos rotativos do servo <i>Dynamixel MX-64T</i> (c) Modelação do encaixe.	40
Figura 3.7 – Modelação do encaixe total do pescoço; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva da traseira	41
Figura 3.8 – (a) Modelação da base do pescoço, encaixe para o servo que realiza o <i>yaw</i> ; (b) Modelação do encaixe do servo DF15RMG na base e no disco rotativo	42
Figura 3.9 – (a) Modelação do encaixe inferior - <i>Short U-sharp servo bracket</i> ; (b) Modelação do encaixe superior - <i>Long U-sharp servo bracket</i> ; (c) Modelação do encaixe superior e inferior no servo DF15RMG ;	42
Figura 3.10 - (a) Modelação da parte frontal do suporte da câmara 3D D455 <i>Intel Realsense</i> ; (b) Modelação da tampa do suporte da câmara 3D D455 <i>Intel Realsense</i> com encaixe para os discos rotativos do servo DF15RMG (c) Modelação do encaixe.	43
Figura 3.11 - Modelação do encaixe total do pescoço	44
Figura 3.12 – Construção final do pescoço	45
Figura 4.1 – Esquema representativo do funcionamento do controlo de CHARMIE.....	51
Figura 4.2 - Representação dos referenciais relativos utilizados na cinemática direta; (a) a partir de um esquema; (b) No pescoço.	51
Figura 4.3 – Referenciais do pescoço de CHARMIE após revolução de 90° na primeira junta ...	54
Figura 4.4 – Espaço de trabalho do pescoço de CHARMIE	55
Figura 4.5 – Esquema lógico do algoritmo de visão do pescoço de CHARMIE.	56
Figura 4.6 - Esquema lógico do algoritmo que realiza o processamento de imagem	57
Figura 4.7 – Representação esquemática das declarações “ <i>if</i> ” aplicadas na função de instruções para o Arduino.....	60
Figura 4.8 – Representação esquemática do programa construído para o Arduino	62
Figura 4.9 – Ligações do Sistema de controlo	62
Figura 4.10 – Garra do objeto para testes experimentais.	63
Figura 4.11 – Servo e engrenagem utilizados no dispositivo de testes experimentais.....	64
Figura 4.12 – Esquema de ligação dos componentes do dispositivo de testes experimentais. ..	64
Figura 4.13 – Teste experimental utilizando as constantes ótimas	67
Figura 4.14 - Teste experimental utilizando as constantes com má performance	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Ângulo de movimento em cada vertebra cervical do pescoço humano	10
Tabela 2.2- Especificações do pescoço humano	11
Tabela 2.3- Proporções médias do pescoço humano	12
Tabela 2.4 – Tabela resumo das soluções existentes para pescoços antropomórficos	18
Tabela 3.1 – Tabela resumo dos requisitos anatômicos do pescoço antropomórfico	30
Tabela 3.2 – Características associadas aos componentes exigidos na construção do pescoço	31
Tabela 3.3 – Pontuação relativamente aos requisitos específicos de cada solução	34
Tabela 3.4 – Tabela de componentes e características do pescoço.....	46
Tabela 4.1 – Parâmetros de rotação e translação de <i>Denavit-Hartenberg</i>	52
Tabela 4.2 – Resultados dos testes experimentais para o eixo do x	66
Tabela 4.3 - Resultados dos testes experimentais para o eixo do y	66

Lista de Símbolos

Siglas, abreviaturas e acrónimos

CHARMIE	<i>Collaborative Healthcare/Home Assistance by Minho Industrial Electronics</i>
DC	<i>Direct Current</i>
GDL	Grau(s) de Liberdade
HSV	<i>Hue, Saturation e Value</i>
LAR	Laboratório de Automação e Robótica
OpenCv	<i>Open-Source Computer Vision</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PLA	Ácido Polilático
UPS	<i>Universal joint, Prismatic pair and Spherical pair</i>
RGB	<i>Red, Green e Blue</i>

Nomenclatura

N_{GDL}	Número de graus de liberdade
nb	Número de corpos que compõem um sistema multicorpo
m	Número de constrangimentos independentes ou massa (kg)
C_x	Coordenada do centroide de um objeto em x
C_y	Coordenada do centroide de um objeto em y
a_{i-1}	Translação no eixo do x
α_{i-1}	Ângulo de rotação segundo o eixo do x
a_i	Translação no eixo z
θ_i	Ângulo de rotação segundo o eixo do z
${}^{i-1}\mathbf{T}_i$	Matriz transformação
M	Momento (Nm)
F	Força (N)
d	Distância (m)
α_x	Número de graus a mover pelo servo do eixo do x
α_y	Número de graus a mover pelo servo do eixo do y

d_x	Distância entre o centro do objeto e o centro da imagem no eixo do x
d_y	Distância entre o centro do objeto e o centro da imagem no eixo do y
v_x	Velocidade do objeto no eixo do x
v_y	Velocidade do objeto no eixo do y
K_1	Constante de posição no eixo do x
K_2	Constante de velocidade no eixo do x
K_3	Constante de posição no eixo do y
K_4	Constante de velocidade no eixo do y

1. INTRODUÇÃO

O grupo de etário com mais de 65 anos apresenta-se como o grupo etário mais fragilizado, um crescimento deste obriga à idealização de estratégias que apõem estes indivíduos.

O projeto CHARMIE (“Collaborative Healthcare/Home Assistance by Minho Industrial Electronics”) é um projeto colaborativo a ser desenvolvido no LAR (Laboratório de Automação e Robótica), cujo objetivo é o desenvolvimento de um robô antropomórfico multifacetado capaz de realizar uma grande variedade de tarefas, baseando-se apenas em soluções de *machine learning* para auxílio em lares, instalações de saúde e ambientes domésticos.

Esta dissertação encontra-se inserida no projeto CHARMIE, tendo como finalidade a construção e controlo de um pescoço antropomórfico, que neste momento é inexistente. Este pescoço deve ser capaz de realizar os movimentos normais de um pescoço antropomórfico, utilizando 3 graus de liberdade e integrando um sistema de visão (usando uma câmara) para deteção e rastreamento de objetos com um sistema de controlo que movimentará o pescoço de acordo com restrições anatómicas coerentes.

1.1. MOTIVAÇÃO

O interesse em robôs antropomórficos autónomos tem aumentado muito para fins educativos, de entretenimento e auxílio dos seres humanos. Os robôs antropomórficos destacam-se por conseguirem manipular objetos e percorrer ambientes, tal como os humanos, e obterem uma aceitação mais elevada devido ao seu aspeto familiar.

A conceção de robôs antropomórficos envolve bastante dedicação em termos de design, controlo e construção para que o resultado final seja algo suave e humanoide e, por isso, torna-se interessante participar num projeto como o CHARMIE.

Para além disso, a visão num robô antropomórfico é uma das mais importantes modalidades de interação com humanos, sendo o controlo do olhar essencial no seu comportamento [1]. O controlo do olhar é predominantemente realizado pela movimentação do pescoço, que ajusta a cabeça e, consequentemente, a visão.

O pescoço humano é um sistema muscular e esquelético bastante complexo [2], que fornece estabilidade, mantém a postura da cabeça, capacita a movimentação, transmite cargas e absorve choques [3] e, portanto, um sistema desafiante de reproduzir.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação prende-se da construção e controlo de um pescoço antropomórfico, de três graus de liberdade, capaz de reproduzir o movimento do pescoço humano e que seja concordante com CHARMIE (*Collaborative Healthcare/Home Assistance by Minho Industrial Electronics*), um robô antropomórfico de assistência médica e doméstica destinado ao auxílio da população. O sistema deste pescoço deve conter 3 graus de liberdade e atuar utilizando visão por computador para deteção e rastreamento de objetos.

Quanto a características principais, estas são, a modularidade, leveza e baixo custo.

Posto isto, estão adjacentes a este objetivo principal um conjunto de objetivos complementares, necessários ao desenvolvimento da presente dissertação. Especificamente, o estudo de robôs e pescoços antropomórficos, o estudo do sistema anatómico do pescoço humano, o estudo e implementação de sistemas de deteção e rastreamento de objetos por visão por computador que permita a localização relativa de objetos no espaço bidimensional, para além de, calcular a trajetória a realizar e, finalmente, o estudo e implementação de um sistema de controlo capaz de satisfazer as características anatómicas de um pescoço, apto ao controlo simultâneo de três motores e funcionamento em conjunto com o sistema de visão.

1.3. ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos lógicos, que seguem a ordem de tarefas necessárias à realização de todos os objetivos propostos e ao desenvolvimento do projeto.

O Capítulo 1 faz uma introdução ao tema de estudo, revelando o enquadramento, os objetivos delineados e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 inicia o estudo do tema, é feita uma revisão bibliográfica dos assuntos relevantes ao desenvolvimento do projeto, nomeadamente, robôs antropomórficos, o CHARMIE, a anatomia do pescoço humano, os pescoços antropomórficos, visão por computador, cinemática direta de sistemas multicorpo e Arduino.

No Capítulo 3, o projeto mecânico do pescoço de CHARMIE é descrito, começando pela descrição dos requisitos iniciais ao projeto e a escolha do mecanismo mais adequado, seguido da exposição do modelo conceptual e da construção do pescoço.

O Capítulo 4 destina-se ao controlo do pescoço, é ilustrado o sistema de coordenadas do pescoço, calculada a cinemática direta e o espaço de trabalho deste, são também esclarecidos os algoritmos de visão por computador e Arduino, bem como a ligação destes dois para que o pescoço

possa atingir o objetivo. No final deste capítulo, são exibidos os testes experimentais realizados de modo a melhorar a performance do pescoço.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o projeto, divulgando as conclusões e os trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, a população global está consistentemente a envelhecer, com o grupo de maiores de 65 anos a ultrapassar todos os outros grupos etários. Na União Europeia, estima-se que este crescimento seja de 19% a 29% nos próximos 50 anos [4]. Sendo este o grupo etário mais fragilizado, um crescimento obriga à necessidade de estratégias e recursos que suportem as fragilidades diárias de indivíduos dependentes, não sobrecarregando o sistema público de saúde. Isto apresenta desafios significativos, com implicações, não só a nível social, mas também a nível económico [4].

Nos estados iniciais de desenvolvimento robótico, os projetistas focavam-se principalmente em robôs industriais automatizados ou robôs com tarefas definidas, que apenas operam em ambientes limitados. Mas, recentemente, o destaque tem sido orientado para “robôs amigos do humano”, devido ao facto de a indústria já ter atingido o máximo benefício possível da tecnologia robótica [3].

Com isto em vista, pode-se considerar os robôs antropomórficos como uma boa solução em termos de suporte e auxílio a uma vida independente. Robôs antropomórficos são considerados uma das últimas formas de robôs inteligentes, estes apresentam as mesmas dimensões e figura dos humanos e, portanto, têm a vantagem de conseguir manipular ferramentas da mesma forma que a sua inspiração, o que sugere a possibilidade de aprendizagem de habilidades humanas [5]. Alguns dos pontos a favor são o facto de conseguirem operarem em diversos ambientes projetados para humanos e a aceitação destes, por parte de utilizadores não qualificados, ser estatisticamente mais elevada, pois apresentam movimentos previsíveis e conhecidos [6].

Combinando as necessidades da população global e o desenvolvimento robótico, surge a idealização de CHARMIE, um robô antropomórfico colaborativo de assistência médica e doméstica. No entanto, a versão mais recente de CHARMIE não apresenta um pescoço, a construção e o controlo de um apresenta-se como o objetivo deste caso de estudo.

Este capítulo tem como objetivo a aquisição e melhor compreensão dos conceitos teóricos a aplicar na presente dissertação, bem como a análise de projetos semelhantes já desenvolvidos. Com isto em vista, serão abordados um conjunto de conceitos, nomeadamente robôs antropomórficos, CHARMIE, anatomia do pescoço humano, soluções existentes de pescoços antropomórficos, bem como, conceitos e dispositivos auxiliares ao controlo de um sistema, particularmente, análise cinemática, visão por computador e Arduino.

2.1. ROBÔS ANTROPOMÓRFICOS

Um robô antropomórfico é um sistema mecatrónico altamente complexo, visto que os requisitos funcionais deste apenas podem ser obtidos através da interação de componentes mecatrónicos, com tecnologia sensorial extensa, atuadores de última geração e software altamente desenvolvido [6].

WABOT-1, desenvolvido por Kato e os seus colegas em 1973, foi o primeiro robô antropomórfico, este foi contruído como um sistema integrado com dois braços, duas pernas, um sistema de reconhecimento de voz, entre outros. O mesmo grupo também desenvolveu um robô antropomórfico tocador de piano, *WABOT-2*, em 1985[7].

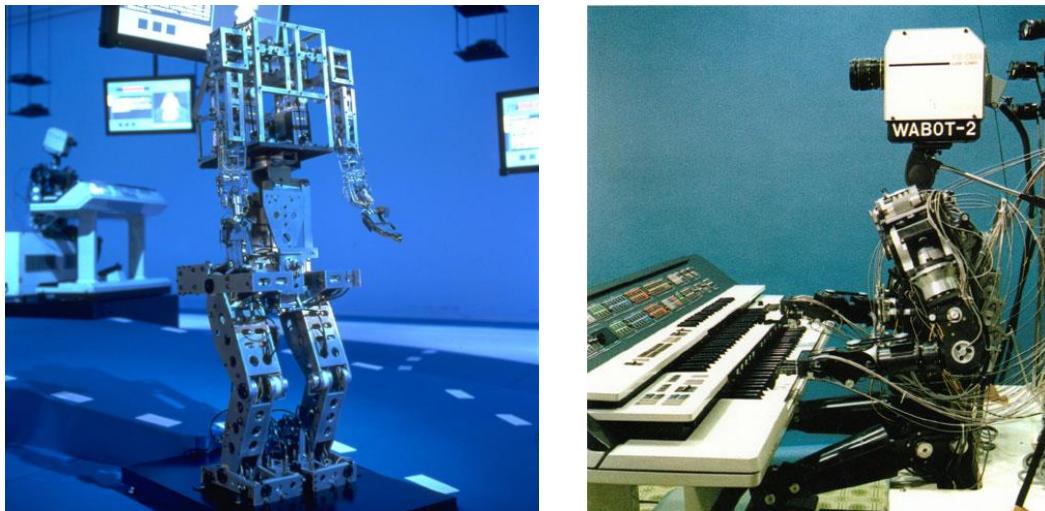


Figura 2.1 - Fotos ilustrativas dos robôs antropomórficos WABOT-1 e WABOT-2, à esquerda e à direita respetivamente [8][9].

A estes primeiros robôs seguiram-se outros, ao longos dos anos. Um deles é o *Qrio*, construído pela *Sony* em 2001, foi projetado para entretenimento através da sua interação com humanos com movimentos e fala. Este conta com 38 juntas flexíveis, apresenta 580 mm de altura e um peso de aproximadamente 6,5 kg [10].



Figura 2.2 – Imagem representativa de Qrio [11].

Outro exemplo, é o caso de *ASIMO*, também de 2001, apresenta 26 graus de liberdade, podendo andar e executar algumas tarefas muito semelhantes a um ser humano, a sua altura é de 120mm e o peso 52 kg [10].



Figura 2.3 – Foto ilustrativa de ASIMO ao lado de uma pessoa [10].

Mais recentemente, é de destacar o desenvolvimento de *WABIAN-2*, que tem como objetivo simular a marcha humana e, assim, testar dispositivos como assistentes de marcha usados em indivíduos com deficiências nos membros inferiores [12].



Figura 2.4 - Foto ilustrativa de WABIAN-2 [13].

2.1.1. CHARMIE

O desenvolvimento de robôs humanoides interativos abre a porta a novas áreas de aplicação como assistência médica, reabilitação, assistência doméstica, educação e entretenimento [3]. Neste sentido, o *Collaborative Healthcare/Home Assistance by Minho Industrial Electronics* (CHARMIE), na Figura 2.5, é um robô antropomórfico de serviços domésticos e de saúde capaz de realizar tarefas em ambientes não padronizados. Este robô tem como objetivo social ser capaz de auxiliar lares, instalações de saúde, casas domésticas, entre outros. O seu objetivo científico é o desenvolvimento de um robô antropomórfico multifacetado capaz de realizar uma grande variedade de tarefas, baseando-se, apenas, em soluções de *machine learning*.

Apesar de, no momento, o CHARMIE não ser totalmente antropomórfico, algumas partes já o são, como o braço, o objetivo é alcançar o nível antropomórfico apresentado na Figura 2.5 (a). O hardware do CHARMIE pode ser dividido em 4 secções: (i) a Plataforma de movimento; (ii) o braço robótico; (iii) o mecanismo de elevação e torso; e a (iv) a cabeça do robô. A sua forma antropomórfica garante que as pessoas que interagem com este robô tenham uma sensação de mais conforto e “amizade” em relação a robôs com outras formas [4].

A versão mais recente de CHARMIE, Figura 2.5 (c), conta com uma câmara RGB-D, uma interface do utilizador multimodal e um microfone, como o peso da cabeça do robô não pôde ser ajustado no sistema atual de elevação, foi introduzido um grau de liberdade para simular um possível pescoço e permitir a rotação da cabeça, este movimento também permite o ajuste da câmara RGB-D para ver objetos a diferentes alturas [4].

Assim, perante as limitações do pescoço existente, é imperativo o desenvolvimento de um mecanismo antropomórfico, com 3 graus de liberdade, capaz de reproduzir os movimentos do pescoço humano para o CHARMIE.

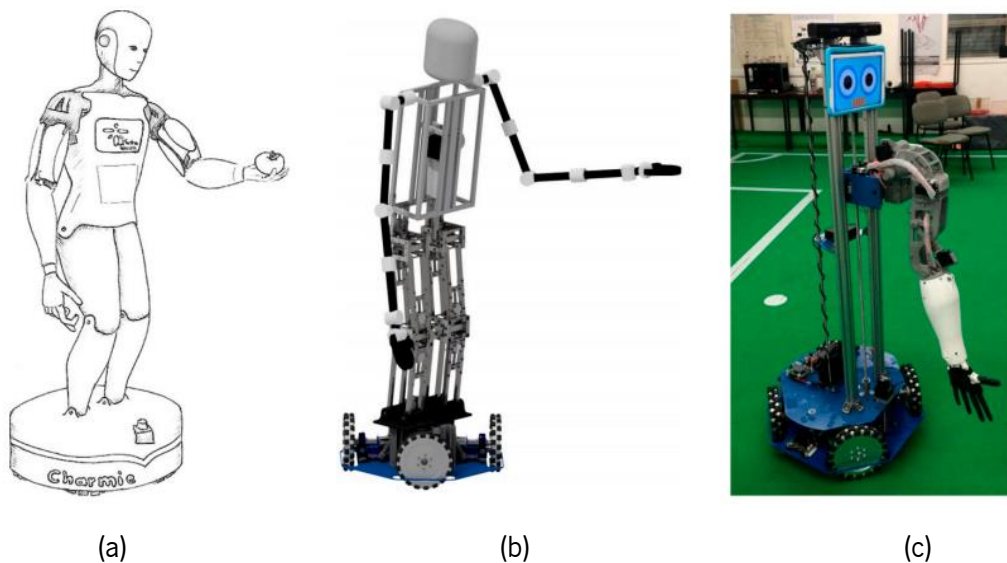


Figura 2.5 – (a) Desenho conceptual de CHARMIE; (b) desenvolvimento do design antropomórfico; (c) Primeiro protótipo montado.[4]

2.2. ANATOMIA DO PESCOÇO HUMANO

Para desenvolver um pescoço antropomórfico para CHARMIE, é necessário estudar a anatomia do pescoço humano e a natureza do seu movimento de modo a projetar um mecanismo que o possa replicar.

O pescoço humano fornece estabilidade, mantém a postura da cabeça, capacita a movimentação, transmite cargas e absorve choques, e, por essa razão, necessita de ser forte e suficientemente móvel [14].

Este apresenta um mecanismo bastante complexo, com mais de 20 músculos e 10 ossos [2]. É constituído por sete vértebras cervicais, geralmente referidas de C1 a C7. A primeira vertebra (C1) designa-se como vertebra Atlas e tem como função o suporte da cabeça[15], possibilitando também a realização do movimento de flexão/ extensão superior [2]. A segunda vertebra (C2), vertebra Áxis, permite a rotação da cabeça. A representação anatómica das vértebras pertencentes ao pescoço encontra-se na Figura 2.6.

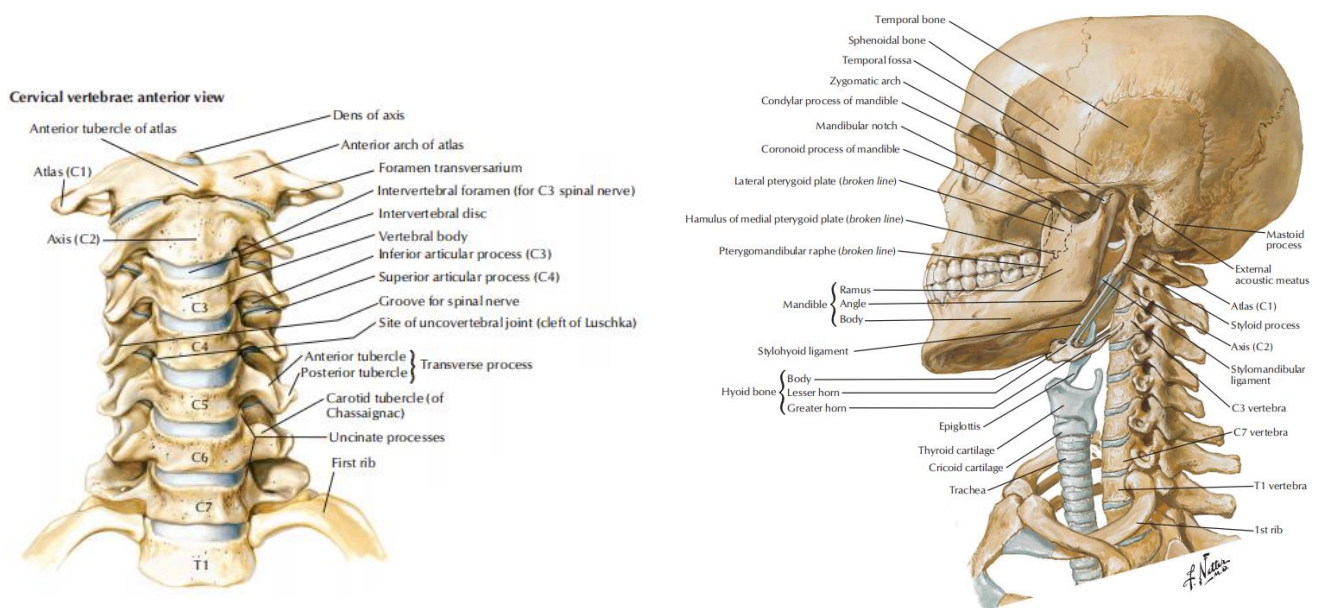


Figura 2.6 – Representação anatómica das vértebras existentes no pescoço humano [16].

Na Tabela 2.1 está presente os ângulos de movimentos do pescoço que acontecem nas vertebra cervicais.

Tabela 2.1- Ângulo de movimento em cada vertebra cervical do pescoço humano [3].

Segmento	Flexão lateral (°)	Flexão lateral (°)	Rotação (°)
C0/C1	30	10	1.0
C1/C2	30		40.5
C2/C3	12		3.0
C3/C4	18	70	6.5
C4/C5	20		6.8
C5/C6	20		6.9
C6/C7	15		5.4

Apesar de cada vertebra ter 6 graus de liberdade, investigadores consideram que o pescoço apresenta 6 graus de liberdade, correspondendo a 3 graus de liberdade de translação e 3 graus de liberdade de rotação. De um ponto de vista prático, os efeitos da translação podem ser negligenciados em maior parte das aplicações, e portanto, o pescoço humano pode ser simplificado a 3 graus de liberdade: inclinação para a frente/trás (flexão/extensão); inclinação para a esquerda/direita (flexão lateral) e torsão para a esquerda/direita (rotação), ou em alternativa podem-se designar por *roll*, *pitch* e *yaw*, respetivamente [15]. O alcance, velocidade e aceleração médios destes movimentos do pescoço estão evidenciados na Figura 2.2.

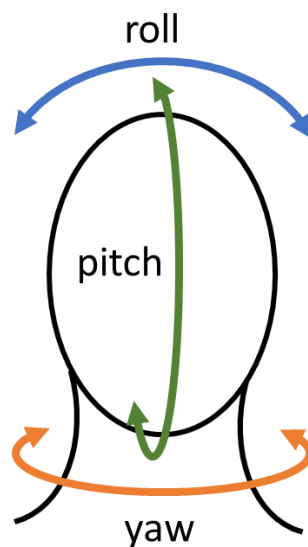


Figura 2.7 – Graus de liberdade do pescoço humano.

Tabela 2.2- Especificações do pescoço humano [17].

	Alcance (°)	Velocidade max (°/s)	Aceleração max (°/s ²)
<i>Pitch</i>	-71 to +103	352	3300
<i>Roll</i>	+/- 63.5	352	3300
<i>Yaw</i>	+/- 100	352	3300

A certo ponto no tempo, o pescoço pode estar numa das seguintes nove posições estáticas, presentes na Figura 2.8, designadas por posturas do pescoço, ou pode-se movimentar em qualquer ordem entre estas nove posturas[18]. Através de [19] foi possível obter as proporções médias do pescoço humano, esta informação encontra-se sumariada na Tabela 2.3.

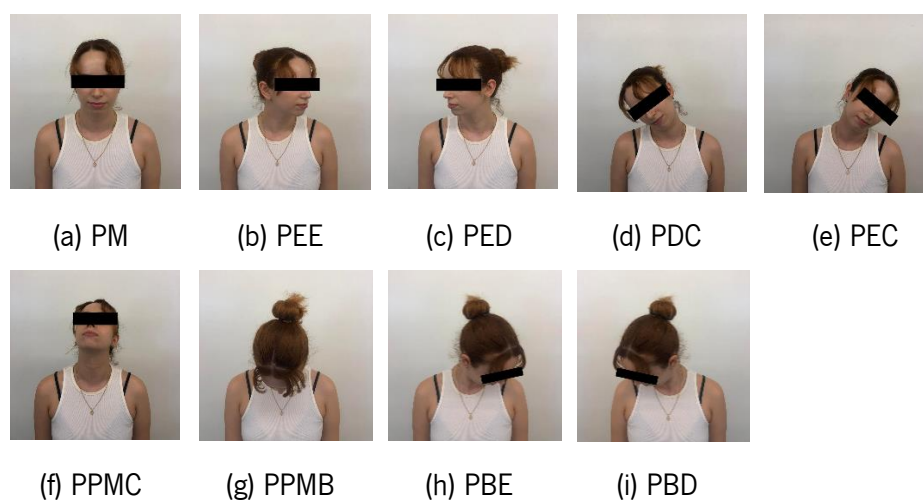
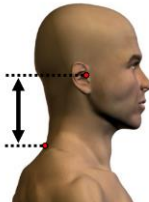


Figura 2.8 – Posições estáticas do pescoço. (a) PM- pescoço no meio; (b) PEE- pescoço na extrema esquerda; (c) PED – pescoço na extrema direita;(d) PCD- pescoço na direita em cima;(C) PEC – pescoço na esquerda em cima;(f)PPMC – pescoço no ponto máximo de cima;(g) PPMB – pescoço no ponto máximo baixo;(h) PBE- pescoço em baixo à esquerda; (i) PBD – pescoço em baixo à direito.

Tabela 2.3- Proporções médias do pescoço humano [19].

	Sexo feminino (mm)	Sexo masculino (mm)	Média (mm)	Imagem representativa
Perímetro (na zona de proeminência laringea)	329,8	367,6	348,7	
Perímetro da base do pescoço	371,2	434,6	402,9	
Comprimento do pescoço	106,3	106,8	106,6	
Comprimento do queixo à linha dos olhos	113,1	122,6	117,9	

Um parâmetro relevante que terá impacto na escolha futura de componentes do sistema do pescoço é o binário, necessário à movimentação de cada grau de liberdade do pescoço humano, isto é, do *roll*, do *pitch* e do *yaw*. Na Figura 2.9 estão presentes a capacidade de geração de movimento dos músculos do pescoço numa posição neutra pelo que se pode aferir o momento máximo em cada grau de liberdade [18]. Para a construção do pescoço antropomórfico de CHARMIE, a extensão e flexão são consideradas apenas um movimento, o *pitch*. Sendo assim, o *pitch* máximo será 34 Nm, o *roll* (flexão lateral) máximo é 23 Nm e o *yaw* máximo (rotação axial) é 11 Nm.

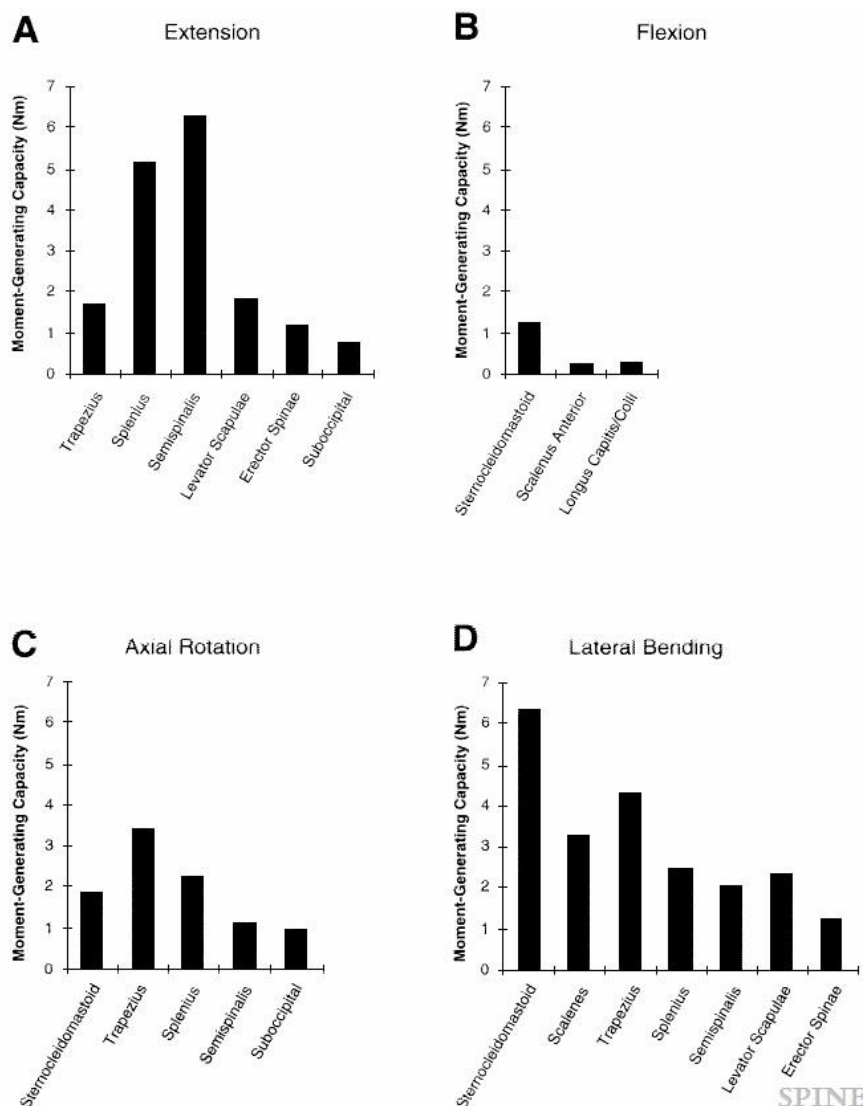


Figura 2.9– Capacidade geradora de momento dos músculos do pescoço numa posição neutra. A, extensão (total = 34 Nm); B, flexão (total = 4 Nm); C, rotação axial (total = 11 Nm); e D, flexão lateral (total = 23 Nm) [18].

2.3. PESCOÇOS ANTROPOMÓRFICOS

Nos últimos anos, várias cabeças humanoides, incluindo pescoços com múltiplos graus de liberdade têm sido desenvolvidos [17]. De uma maneira geral, existem 2 tipos de pescoços de robôs, o primeiro corresponde a pescoços de movimento rápido e estes apresentam entre 2 a 3 graus de liberdade, o segundo tipo, com movimentos mais lentos exibe pescoços de 3-7 juntas (esféricas, esféricas e rotacionais ou universais e rotacionais), com um total de entre 9-19 GDL [14]. Este último tipo de pescoços é otimizado para expressar uma variedade de diferentes emoções [17].

Apesar de existirem vários mecanismos de pescoço robótico desenvolvidos por diferentes instituições, estes podem ser divididos em 4 categorias, nomeadamente, pescoço em série, pescoço em paralelo, pescoço à base de mola e pescoço esférico. Sendo que os mecanismos de pescoço em série são os mais comuns, devido à sua simplicidade de estrutura e facilidade de controlo do motor DC [15].

Relativamente aos pescoços dos robôs já apresentados, sabe-se que *ASIMO* e *WABOT-1* apresentam 2 GDL e *Qrio* e *WABIAN-3* apresentam 3 GDL, no entanto, não foi possível encontrar informação relativa ao mecanismo usado na realização do movimento.

Não obstante, através de pesquisa de soluções existentes para pescoço antropomórfico, foi possível identificar 7 mecanismos de pescoço já implementados, nomeadamente, o *iCub* [10], que apresenta um estudo de três mecanismos, o IRH [3], *The humanoid neck* [17], *low motion noise humanoid head* [15] e *Marko* [14]. Estes serão descritos seguidamente.

2.3.1. iCUB

Começando por *iCub* [2], [10], este apresenta 3 soluções, um mecanismo de mola, um mecanismo em paralelo e um mecanismo em série todos com 3 graus de liberdade.

- O mecanismo em mola é inspirado pela flexibilidade do pescoço humano e é atuado com 3 cabos separados 120°, produzindo um movimento esférico da cabeça, o motor final pode ser incluído no topo, assumindo a função de atlas. Como apresenta uma ligação flexível, é construído com materiais mais leves e baratos sendo isso uma vantagem, apesar disso, a análise dinâmica e controlo desta ligação flexível é bastante mais complexa do que uma ligação rígida. Para realizar o sistema de controlo seria necessária uma estrutura de sensores, de modo a aplicar um sistema de retorno. Por último, os motores neste design teriam de ser aplicados no peito do robô, o que punha em causa a sua modularidade. Por estas razões, esta solução não foi adotada [10] (Ver Tabela 2.4).

- O mecanismo em paralelo consiste numa estrutura de 3-UPS, em que cada gerador de ligação ativa é composto por uma junta universal, uma junta prismática e uma junta esférica. Devido à sua geometria complexa, o design desta solução não é muito trivial. A desvantagem mais considerável deste mecanismo é que é muito difícil de evitar interferência entre as diferentes partes para movimentos grandes, o que leva à diminuição significativa da sua área de trabalho, pelo que esta solução também não foi implementada [10] (Ver Tabela 2.4).

- O mecanismo em série é simples, mas robusto, fácil de controlar e de alta performance. Este é composto por três juntas de revolução. A primeira junta corresponde ao *pitch*, seguida pela junta do *roll* e da junta do *yaw*. O design é compacto e apresenta 3 atuadores diferentes para cada uma das

3 juntas aplicadas. O mecanismo do sistema de acionamento é formado por um motor DC (junto com uma respetiva caixa de engrenagens e codificador), buchas rotacionais, parada mecânica e sensor de posição absoluta. Esta solução apresenta também sistema de embraiagem de sobrecarga que aumenta a robustez do mecanismo, dando-lhe a possibilidade de cair sem sofrer grandes impactos, aquando da interação com o mundo exterior [10](Ver Tabela 2.4).

2.3.2. IRH

O pescoço do robô IRH está projetado para permitir o uso de 3 graus de liberdade, através do uso de três motores DC com codificadores. Foram também adicionados rolamentos para tolerar cargas excessivas, que são aplicadas nos eixos dos motores atuadores, ao mesmo tempo, aumentam a suavidade dos movimentos e diminuem o desgaste por fricção.

Todos os componentes usados para construir o pescoço robótico, como motores, rolamentos e componentes estruturais, foram selecionados para obter as acelerações e as velocidades na execução dos movimentos necessários a um humano [3](Ver Tabela 2.4).

2.3.3. THE HUMANOID NECK

O pescoço desenvolvido em [17] apresenta 4 graus de liberdade, sendo estes correspondentes ao *yaw*, *upper pitch*, *lower pitch* e *roll*.

De modo a evitar os problemas relacionados à sobreposição de massas de um mecanismo em série e a fricção causada num pescoço com acionamento por cabo, neste mecanismo, os dois motores com maiores cargas, responsáveis pelo movimento de *yaw* e *lower pitch*, são posicionados estaticamente em relação ao pescoço. Isto significa que os motores maiores e mais fortes podem ser escolhidos sem afetar a performance e o peso do pescoço. O *roll* e o *upper pitch* são posicionados em série no topo do atuador diferencial.

A maior desvantagem do uso de um atuador diferencial é o facto de este ser mais complexo que uma configuração em série e, por isso, foi necessário um maior detalhe no design [17] (Ver Tabela 2.4).

2.3.4. LOW MOTION NOISE HUMANOID HEAD

No artigo [15] é desenvolvido um pescoço capaz de realizar movimento silenciosamente, de modo a não interferir com indivíduos que usam dispositivos de comunicação.

O pescoço final apresenta 3 GDL que replicam os movimentos do pescoço humano, estes são realizados a partir de atuadores remotos instalados numa caixa isoladora de som e ligados por um grupo de caixas de cabos. Estes atuadores são controlados via PC, tendo por base uma placa controladora PCI.

O sistema do pescoço consiste numa mola compressora que conecta dois pratos, o prato inferior é fixado ao torso, enquanto o prato superior, conjuntamente com as outras partes ligadas a este, pode ser preso a 4 cabos acionadores, que se encontram distribuídos simetricamente, e, por isso, este prato consegue realizar 2 GDL, incluindo o *pitch* e o *roll*. As quatro pequenas polias na superfície do prato superior aumentam a força de aperto exercida pelos cabos. O final dos cabos acionadores é preso no prato inferior e estes quatro cabos são guiados para o pescoço robótico pelas suas caixas de cabos.

O movimento de *yaw* do pescoço é atingido através da estrutura cabo-polia que está ligado ao prato superior, através de um grupo de eixo e rolamentos de esferas. O grupo de eixo e rolamento de esferas é uma estrutura que reduz fricção e ruído [15] (Ver Tabela 2.4).

2.3.5. MARKO

Marko [14] é um robô assistente médico na terapia de crianças com paralisia cerebral, atuando como demonstrador de exercícios.

O pescoço de *Marko* tem 2 GDL e permite movimentos de flexão-extensão 100° e de rotação $\pm 90^\circ$ e a combinação destes dois movimentos. É baseado num mecanismo diferencial com três engrenagens cónicas, em que as primeiras duas são acionadores e idênticas e a terceira acionada por estas. Se as engrenagens tiverem a mesma velocidade circunferencial e a mesma direção de rotação, então o pescoço movimenta-se no eixo do *pitch* (flexão e extensão), Figura 2.10(b), na direção oposta de rotação, o pescoço movimenta-se no eixo do *yaw*, Figura 2.10(c). Se as velocidades circunferenciais das engrenagens forem diferentes, surge uma combinação destes dois movimentos, correspondente ao *roll*, Figura 2.10(d).

O acionamento consiste em dois pratos de suporte que são posicionados no atuador, bem como os elementos de transmissão de movimento, como rolamentos, eixos e engrenagens. O atuador é um motor DC redutor planetário com 3 estados e um codificador magnético. A engrenagem helicoidal de acionamento é fixada diretamente no eixo do redutor [14](Ver Tabela 2.4).

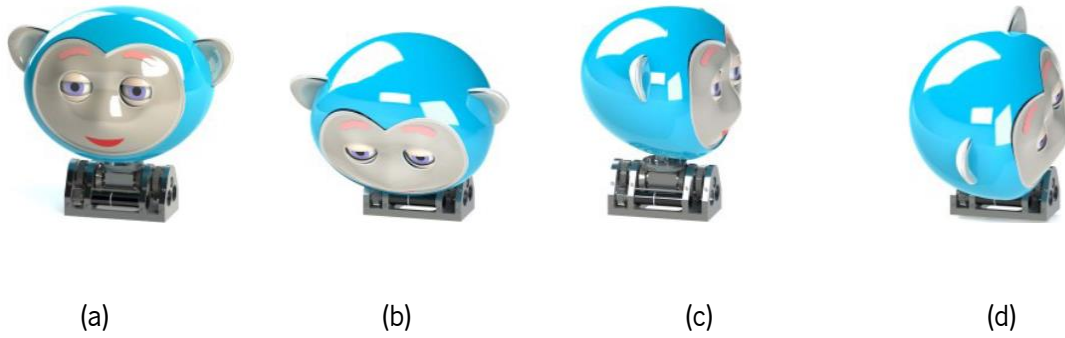


Figura 2.10- Posições do pescoço de Marko (a) Posição neutra do pescoço; (b) Rotação do pescoço no eixo do *pitch* (flexão); (c) Rotação do pescoço no eixo do *yaw* para a lateral esquerda; (d) Rotação do pescoço no eixo do *roll* para a direita [14].

Tabela 2.4 – Tabela resumo das soluções existentes para pescoços antropomórficos.

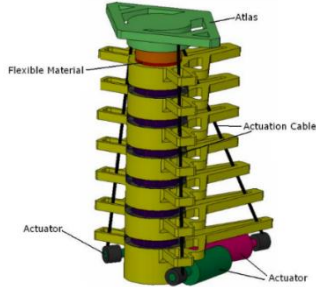
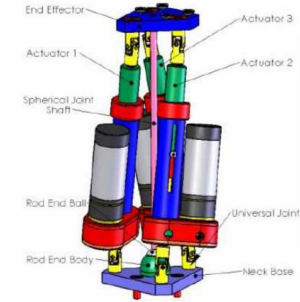
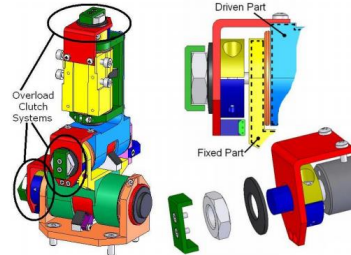
Nome	GDL	Massa (kg)	Dimensões (cm)	Princípio do mecanismo	Vantagens	Desvantagens	Imagem esquemática	Ref
<i>iCub</i>	3	1,5	17 9	Configuração usando uma mola	- Baixa massa - Baixa custo - Alta velocidade com consumo de energia diminuto - Baixa Inércia, o que é indicado na interação com objetos frágeis e ações delicadas	- Os motores teriam de ser posicionados no peito do robô, prejudicando assim a modularidade do design. - O centro de rotação é difícil de estimar porque depende do tamanho da mola, da sua elasticidade e na tipologia dos atuadores		[2], [10]
				Configuração em paralelo	- Alta precisão - Alta capacidade de carga - Alta rigidez - Espaço interior para cabos - Soluções simples na cinemática inversa. - Como os motores se encontram fixos na base a inercia da zona que move é relativamente pequena	- Área de trabalho reduzida devido ao par esférico passivo. - Os atuadores tiveram que ser feitos à medida. - Muito difícil de evitar interferências entre várias partes para movimentos grandes		
				Configuração em série	- Simple e robusto - Fácil de controlar - Alta performance	Foi necessário adicionar um sistema de embraiagem de sobrecarga, na ligação do movimento de Yaw de modo a tornar este design mais resiliente a quedas e acidentes		

Tabela 2.4 – Tabela resumo das soluções existentes para pescoços antropomórficos (continuação).

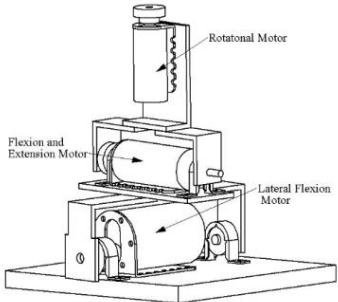
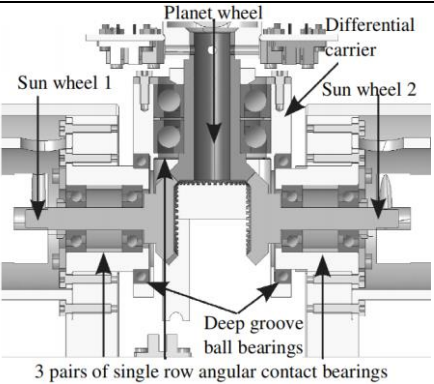
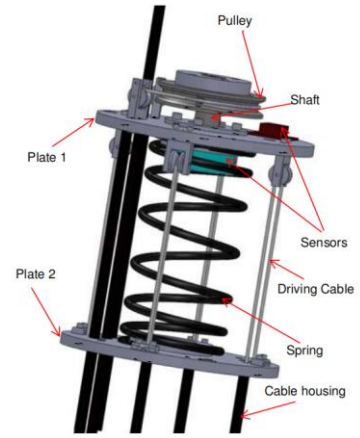
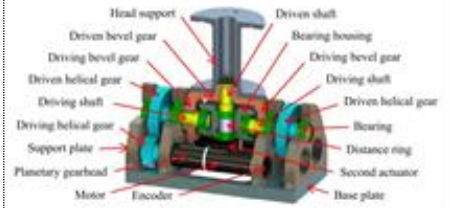
Nome	GDL	Massa (kg)	Dimensões (cm)	Princípio do mecanismo	Vantagens	Desvantagens	Imagem esquemática	Ref
IRH	3	1,42	$h=31$ $l=20$	Configuração em série	• Robusto • Fácil de controlar	• Ainda em fase de construção, informações apenas relativas a modelos e simulações		[3]
<i>The humanoid neck</i>	4	3,7	NE	Dois atuadores em série e um estático na base	• Compacto • Baixa carga móvel • Os motores do <i>yaw</i>, <i>lower pitch</i> são estáticos em relação ao pescoço, o que significa que podem ser escolhidos motores maiores e mais potentes sem afetar a performance do pescoço	• O uso de um acionamento diferencial acarreta a desvantagem de ser complexo em relação a uma configuração em série		[17]

Tabela 2.4 – Tabela resumo das soluções existentes para pescoços antropomórficos (continuação).

Nome	GDL	Massa (kg)	Dimensões (cm)	Princípio do mecanismo	Vantagens	Desvantagens	Imagem esquemática	Ref
<i>Low motion noise humanoid head</i>	3+1 maxilar	NE	NE	Configuração utilizando uma mola e pratos rotativos	• O uso de um grupo composto de cabos e caixas tem como vantagens: a simplificação da transferência mecânica significativamente • Redução de ruído	• Número elevado de componentes		[15]
<i>Marko</i>	3	2	$h=0,92$ $\neq 1,64$ $c=0,84$	Mecanismo diferencial com duas engrenagens acionadoras e uma acionada	• Engrenagens cônicas espirais fornecem baixa folga	• Peças com processo de fabrico complexo		[14]

*NE- Não Especificado

2.4. SISTEMA DE CONTROLO

Automação robótica é um processo de extrema importância em ambientes industriais, já que melhora a qualidade de uma dada tarefa, reduzindo o tempo e a intervenção humana [20]. Atualmente, existem inúmeros cursos *online*/plataformas e *software* de acesso livre que mudaram a maneira como técnicos e engenheiros atualizam e evoluem o seu conhecimento, como *Matlab* e *Python*, mas, de um modo geral, carece de implementação em sistemas reais [21]. Neste sentido, torna-se valioso o uso de sistemas de baixo custo com uma variedade de sensores e atuadores capazes de ser aplicados em diferentes cenários e tarefas [21], como o Arduino.

Neste capítulo serão estudadas as opções mais viáveis, tanto em termos de *software*, como sistemas de implementação para o controlo do pescoço de CHARMIE, tendo em conta o seu objetivo. Começando pela elucidação teórica sobre a cinemática direta de sistemas multicorpo, seguida da exposição da visão por computador e do Arduino.

2.4.1. CINEMÁTICA DIRETA DE SISTEMAS MULTICORPO

Apesar dos robôs antropomórficos terem diferentes formas estruturais, nos últimos anos, têm sido mais desenvolvidos aqueles com movimentos rotativos com 3 ou mais eixos [22].

De uma forma geral, pode-se considerar que um sistema multicorpo apresenta duas características principais: (i) componentes mecânicos que descrevem grandes deslocamentos translacionais e rotacionais e (ii) juntas cinemáticas que impõem constrangimentos e restrições em corpos com movimento relativo [23].

A análise cinemática é o ponto de partida para o estudo de um manipulador robótico. *Kecskeméthy, Krupp e Hiller* (1997) aconselham a decomposição de um sistema de várias cadeias em subsistemas para que a sua análise cinemática seja simplificada [24].

O número mínimo de variáveis necessárias para descrever completamente a configuração de um sistema é denominado GDL. Quando um sistema multicorpo é completamente definido pela orientação de um dos seus corpos, diz-se que este apresenta um grau de liberdade [23].

O número de graus de liberdade de um sistema multicorpo pode ser avaliado como a diferença entre sistema de coordenadas e o número de constrangimentos independentes. A expressão matemática que sumariza esta ideia é conhecida como o critério de *Gruebler Kutzback* e pode ser escrito como [23]:

$$N_{GDL} = 6_{nb} - m \quad (1)$$

Em que nb representa o número de corpos que compõem um sistema multicorpo e m é o número de constrangimentos independentes.

Na cinemática direta, os parâmetros conhecidos (parâmetros de entrada) são ângulos absolutos de rotação de, por exemplo, 3 elementos móveis e o parâmetro a determinar (parâmetros de saída) são 3 coordenadas absolutas do ponto P , correspondente ao efector final [22].

Em relação à definição da cinemática direta, a metodologia para obtenção da modelagem matemática da sua posição exige a fixação dos sistemas de referenciais em cada uma das juntas do pescoço, uma vez alocados os sistemas de referenciais, torna-se possível localizar a descrição espacial dos respetivos elos das juntas[24].

Depois, recorre-se à determinação dos parâmetros de *Denavit-Hartenberg* para cada transformação individual entre uma junta e a seguinte, através da análise do manipulador. Os parâmetros são os seguintes:

- a_{i-1} : Translação no eixo do x
- α_{i-1} : Ângulo de rotação segundo o eixo do x
- d_i : Translação no eixo z
- θ_i : Ângulo de rotação segundo o eixo do z

O passo final é o produto das matrizes individuais de transformação, originando a matriz total, transformação que apresentará as coordenadas cartesianas em termos de coordenadas conjuntas.

As matrizes de transformação individual seguem a seguinte base:

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.4.2. VISÃO POR COMPUTADOR

Nos últimos anos, métodos de *deep learning* demonstraram ter uma performance superior a técnicas anteriores de *machine learning* de última geração em diversos campos, sendo a visão por computador um dos casos mais proeminente [25]. Sendo um método não destrutivo que pode ser usado para inspeção, avanços na visão por computador, permitiram novas oportunidades para criação de aplicações não só na robótica, mas também em ramos como a agricultura, indústria alimentar [26], indústria têxtil [27] e medicina [28].

Soluções tecnológicas baseadas em processamento de imagem e técnicas de visão por computador são caracterizadas por uma alta fiabilidade e eficiência e podem remover desvantagens presentes em técnicas tradicionais [27]. Além disto, atualmente, soluções de sistemas de controlo, usando estas duas técnicas, não requerem programação complexa. Existem várias bibliotecas que compreendem ferramentas que possibilitam a resolução de diversas aplicações industriais diferentes, permitindo um desenvolvimento rápido e algoritmos mais seguros. Assim, a tarefa principal passa por escolher a melhor combinação de ferramentas de processamento de imagem e organizá-las na sequência correta [27].

De entre os problemas mais comuns resolvidos, recorrendo à visão por computador, destaca-se a deteção de objetos/determinação de posição, rastreamento de objetos, reconhecimento de ação, estimativa de pose humana e segmentação semântica [25]. No presente trabalho, apenas serão, objeto de estudo a deteção de objetos e rastreamento de objetos.

A deteção de objetos/determinação de posição é um processo de deteção de instâncias de objetos semânticos de uma certa classe (como humanos, aviões, pássaros) em imagens digitais e vídeos [25]. Este método pode ser usado para caminhos pré-definidos e desvio de obstáculos [29]. Primeiro a visão tem que capturar a imagem que contem o objeto e depois usar uma ferramenta de *Pattern Locating* para o encontrar. A região de interesse é então filtrada, de modo a reduzir o ruído de fundo, finalmente, outra ferramenta é usada para medir a área do objeto [30].

O rastreamento de objetos, com um nome autoexplicativo, teve como trabalho pioneiroo proposto em 1988 por Kass, Witkin e Terzopoulos, que foi denominado modelo de contorno ativo (ACM- *Active Contour Model*) ou *snakes*. Nesta técnica, a segmentação do objeto é feita através de *splines* que são guiadas, iterativamente, a partir de forças de restrição externas à imagem e forças localizadas no contorno do objeto, na direção de um mínimo local, viabilizando a deteção de arestas, linhas, contornos e outras características [31]. A Iluminação e obstrução são as principais falhas observadas em rastreamento de objetos [32].



Figura 2.11 – Comparação entre resultados de detecção de objetos [25].

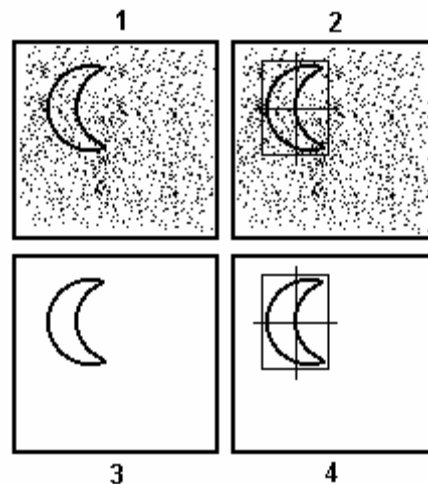


Figura 2.12 – Etapas do método de detecção de objetos utilizando visão por computador [30].

A biblioteca *OpenCV* (*Open Source Computer Vision*) foi criada em 1999 por *Gary Bradski*, tendo como objetivo acelerar a investigação e as aplicações comerciais em visão por computadores, tornando assim este ramo de programação mais fácil. Sendo uma ferramenta de livre acesso, esta tem um forte apoio da comunidade que a utiliza, que contribuindo ativamente no melhoramento desta biblioteca [33].

Atualmente, o *OpenCV* tem interface para as linguagens de programação C++, C, *Python* e *Java*, tendo suporte nos principais sistemas operativos como a Windows, Linux, Mac OS, iOS e Android. As suas aplicações variam desde sistemas de controle até robótica avançada [34].

Dentro da biblioteca *OpenCV*, pode-se destacar um conjunto de comandos relevantes no presente trabalho:

GaussianBlur – este comando permite que quaisquer zonas com demasiado detalhe na imagem sejam suavizadas minimizando o desfoque excessivo [35] e pormenores irrelevantes.

FindContours esta ferramenta localiza contornos dentro de uma imagem de entrada correspondente a um contorno pré-treinado de um objeto de interesse [36]. Não se restringe apenas a retas, encontrando também contornos curvilíneos, estes contornos podem ser posteriormente colocados em retângulos, possibilitando a medição da sua área [33]. O comando *cv.CHAIN_APPROX_NONE* guarda apenas os pontos dos limites necessários ao contorno do objeto, removendo os pontos redundantes e com isto salvando memória [36].

DrawContours apresenta-se como uma ferramenta complementar a *FindContours* desenhando os contornos encontrados. Tem como primeiro argumento a imagem de origem, segundo argumento os contornos numa lista de *python* e terceiro o índice desses contornos (no caso de se querer desenhar todos os contornos coloca-se -1), os restantes argumentos referem-se à cor, espessura, etc [36].

Na Figura 2.13 é possível ver o resultado da utilização destas ferramentas numa imagem de origem. Os contornos da imagem da esquerda, são detetados pelo comando *FindContours* eo comando *DrawContours* faz com que estes contornos sejam visíveis (linha verde).

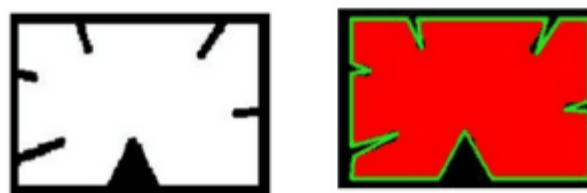


Figura 2.13 -Resultado da utilização das ferramentas *DrawContours*, e *FindContours* [37].

Moments O momento de uma imagem em *OpenCV* é uma média ponderada da intensidade de pixels numa determinada imagem/forma. Com a ajuda do momento da imagem, é possível encontrar propriedades específicas, tais como o seu raio, área, centroide etc. O centroide de uma forma é a média aritmética de todos os seus pontos [38]. A fórmula do centroide é dada pelo seguinte:

$$C_x = \frac{M10}{M00} \quad (3)$$

$$C_y = \frac{M01}{M00} \quad (4)$$

Onde, C_x é a coordenada do x , C_y é a coordenada do y do centroide e M é o momento.

Circle Este comando foi construído com o intuito de desenhar um círculo em qualquer imagem, este apresenta como primeiro argumento a imagem de origem, como segundo as coordenadas do centro, como terceiro o raio e como últimos a sua cor e espessura [39]. Este comando é geralmente utilizado em conjunto com o comando *Moments*.

A Figura 2.14 apresenta o resultado da utilização dos comandos *FindContours*, *drawContours*, *Moments* e *Circle*.



Figura 2.14 - resultado da utilização dos comandos *FindContours*, *drawContours*, *Moments* e *Circle* [40].

Na presente dissertação, será utilizada a cor do objeto no algoritmo para deteção e rastreamento do mesmo. A identificação e rastreamento a partir da cor é realizada a partir da comparação entre os parâmetros que representam os pixels da imagem no espaço de cor adotado, com um intervalo de valores especificada pelo utilizador. Feita a comparação, é composta uma matriz binária, a partir da imagem original. Nela, os elementos que se encaixam no intervalo de valores desejada são representados pelo

valor binário "1", enquanto os restantes elementos são substituídos por "0", gerando um mapa de *bits* [41].

Ao utilizar *OpenCV*, a imagem/vídeo utilizado é automaticamente convertido para o sistema GBR (*green, blue, red*), no entanto, este sistema apresenta algumas desvantagens no processo de rastreamento, pois, num espaço de cores aditivo, as componentes como luminosidade e cromaticidade encontram-se distribuídos entre os valores de vermelho, verde e azul, estabelecendo uma interdependência entre as cores básicas para quaisquer variações [41]. Por isso, neste caso, será utilizado o modelo HSV (*hue, saturation e value*), este funciona como o sistema visual humano e é uma combinação de matiz (*hue*), que representa o tipo de cor, saturação, que representa a pureza da cor e o valor, que representa a claridade da cor [32]. Este sistema apresenta maior sensibilidade a ruídos quando comparado com GBR [41].

2.4.3. ARDUÍNO

O *Arduíno* foi criado em Itália em 2005 por *Massimo Banzí*. Este dispositivo consiste numa placa de controlo de entrada de dados (IN) como, por exemplo, sensores, e saída de dados (OUT), como motores e leds. Apresenta um cristal oscilador de 16 Mhz, um regulador de tensão de 5V, botão *reset*, *plug* de alimentação, pinos conectores e alguns LEDs para facilitar a verificação do seu funcionamento. A entrada USB fornece alimentação enquanto estiver conectada ao computador e a tensão de alimentação quando desconectado pode variar de 7V a 12V, graças ao regulador presente na placa [42].

No *Arduíno* as ordens são transmitidas pelo computador através de *Bluetooth*, *wireless*, USB ou infravermelho e são traduzidas utilizando a linguagem *Wiring* que se baseia em C/C++. Os programas escritos usando *Arduíno* são chamados *sketches* que são escritos no editor de texto, e são salvos com a extensão de "arquivo.ino". A consola mostra a saída de texto do *Arduíno*, incluindo mensagens de erro completas e outras informações. O canto inferior direito mostra a *board* atual e a porta série [42].

A vantagem da utilização do *Arduíno* deve-se ao seu baixo custo, à sua compatibilidade com vários sistemas operativos, à utilização de uma linguagem simples e ao seu software livre que conta com documentação extensiva e exemplos de código.

Atualmente existem vários modelos de *Arduíno*, nomeadamente, *Arduíno UNO*, *Arduíno 2009*, *Arduíno Mega 2560*, *Arduíno Nano* e *Arduíno Mega*. No presente trabalho será utilizado o *Arduíno UNO*, na Figura 2.15.

A *breadboard* é uma base de construção de protótipos eletrónicos que não requer soldagem e, portanto, é reutilizável. Normalmente, apresenta quatro matrizes e a ligação de circuitos é feita através

de *jumper*s (fios pequenos) [42]. A sua maior vantagem é a facilidade de criação de protótipos temporários e construção de circuitos mais complexos em montagens de projetos com *Arduino*.

Na Figura 2.16 estão representadas as matrizes de uma *breadboard*. A matriz 2 geralmente, é usada para ligação inicial de energia e a sua transmissão é de coluna em coluna. A matriz 5 é usada na utilização de componentes no circuito e a transmissão de linha em linha.

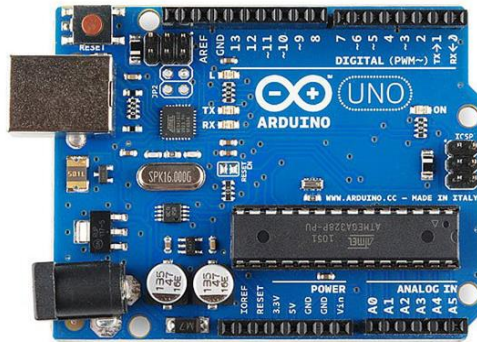


Figura 2.15 - Arduino UNO [43].

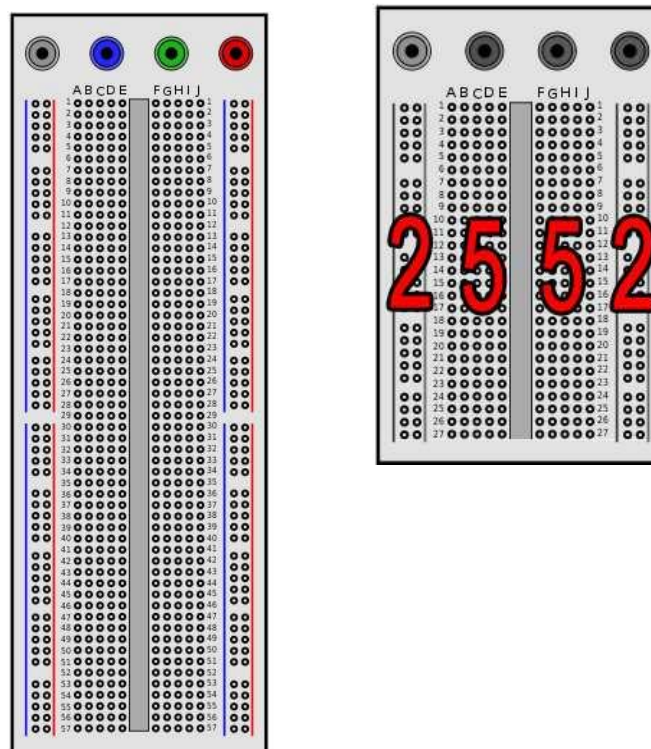


Figura 2.16 – Desenho esquemático de uma *Breadboard* [42].

3. PROJETO MECÂNICO

A conceção do pescoço antropomórfico de CHARMIE exige a existência de várias fases, de modo à obtenção de um equipamento final completo, coeso e justificado.

No capítulo de projeto mecânico serão abordadas as etapas seguintes: requisitos iniciais, onde serão avaliados quais os requisitos anatómicos, de sistema e de material necessários à construção do pescoço de CHARMIE, concluindo com a escolha de mecanismo mais adequada a estes; Projeção do modelo conceptual do pescoço, utilizando o *software* de modelação *SolidWorks*, e, por fim, a conceção do pescoço apresentando e caracterizando todos os seus componentes.

3.1. REQUISITOS INICIAIS

A etapa de esclarecimento de tarefas é o primeiro estágio de um projeto e tem como objetivo identificar o problema e os requisitos iniciais através do levantamento de informação e de restrições [44]. Assim, este subcapítulo debruça-se sobre os requisitos necessários à construção do pescoço antropomórfico de CHARMIE, estes apresentam-se como requisitos anatómicos, de sistema e de material.

3.1.1. REQUISITOS ANATÓMICOS

Como exposto no capítulo anterior, o pescoço é um sistema bastante complexo, tendo em suma um total de 3 graus de liberdade e 9 possíveis posturas. A Tabela 3.1 mostra o resumo de todas as restrições anatómicas a ter conta, aquando da construção do pescoço antropomórfico de CHARMIE. As proporções do mecanismo, idealmente, devem ser menores que as proporções humanas, de modo a permitir a colocação de uma carcaça que fornece proteção de agressões exteriores e uma aparência mais humana.

A cabeça humana tem em média entre 2,3 a 5 kg [45]. Uma vez assumidos os binários máximos, como descrito anteriormente, será também utilizada a massa máxima da cabeça.

Tabela 3.1 – Tabela resumo dos requisitos anatómicos do pescoço antropomórfico.

Proporções (mm)	Perímetro (na zona da proeminência laringea)		348,7		
	Perímetro da base do pescoço		402,9		
	Comprimento do pescoço		106,6		
	Comprimento do queixo à linha dos olhos		117,9		
Movimento	Graus de Liberdade		3		
	Posições possíveis		9		
			<i>Pitch</i>	<i>Roll</i>	<i>Yaw</i>
	Binário max (Nm)		34	23	11
	Alcance(°)		-71 até +103	+/- 63,5	+/- 100
	Velocidade (°/s)	Max	342		
	Aceleração (°/s ²)	Max	3300		

3.1.2. REQUISITOS DE SISTEMA

Relativamente às especificações do sistema, existem alguns parâmetros a ter em conta, nomeadamente, os dispositivos fornecidos e as características desejadas do sistema.

Dispositivos

Aquando do início da presente dissertação, foram fornecidos 3 servos motores, bem como uma câmara pelo LAR, com o objetivo da utilização destes da construção do pescoço antropomórfico de CHARMIE. Posto isto, as proporções destes servos devem ser consideradas.

A Tabela 3.2, seguinte, apresenta as medidas associadas a estes dois componentes.

Tendo em conta que a presente dissertação se foca apenas na construção e controlo de um pescoço robótico antropomórfico, está fora do tema a construção de uma cabeça para o CHARMIE, e portanto, para efeitos de cálculo, a massa da cabeça do CHARMIE será a massa da câmara 3D D455 *Intel Realsense* a ser colocada no topo do pescoço. Esta apresenta 100g.

Em proporção com os valores de binário apresentados na Tabela 3.1, isto significa que para o pescoço de CHARMIE, o binário a realizar para os movimentos de *pitch*, *roll* e *yaw* será de 0,68 Nm, 0,46 Nm e 0,22 Nm, respetivamente (assumindo uma cabeça humana de 5kg), estando estes servos aptos à realização destes movimentos.

Como os 3 servos diferem em termos de binário, de modo a prevenir a danificação destes dispositivos, o servo motor, que apresenta o menor binário (Servo DF15RMG) será utilizado para realizar o movimento do pescoço que também apresenta o menor binário necessário, neste caso, o *yaw*.

Os dois servos *Dynamixel MX-64T* serão usados no movimento de *pitch* e *roll*.

Os motores apresentados já dispõem de *encoders*, pelo que é possível o controlo da posição angular, facilitando o posterior controlo do pescoço.

Tabela 3.2 – Características associadas aos componentes exigidos na construção do pescoço

Componente	Qtd.	Massa (kg)	Binário max (Nm)	Atravancamento (mm)(<i>c</i> x <i>l</i> x <i>h</i>)	Modelação 3D	Notas
Servo Dynamixel MX-64T	2	0,165	5,5 (com 11,1 [V] e 3,9[A]) 6,0 (com 12[V] e 4,1[A]) 7,3 (com 14,8 [V] e 5,2[A])	41 x 40,2 x 61,1		A ser utilizado para o movimento de <i>pitch</i> e <i>roll</i>
Servo DF15RMG	1	0,064	1,89	40 x 40 x 20		A ser utilizado para o movimento de <i>yaw</i>
Câmara 3D D455 Intel Realsense	1	0,1	irrelevante	26 x 124 x 29	 [46]	

Características

O sistema deve apresentar um conjunto de características para que a sua qualidade e conceção sejam asseguradas:

Antropomórfico.

O objetivo do CHARMIE é a atuação em ambientes não padronizados e interação com humanos, tendo a forma de um robô antropomórfico. Isto obriga à construção de um pescoço com aspeto humanoide que replique os movimentos humanos e, portanto, exiba 3 graus de liberdade.

Seguro.

O pescoço de CHARMIE deve ser seguro para os utilizadores. Para garantir esta segurança, evitando colusões e acidentes, o centro de massa deverá estar o mais baixo possível. O sistema deve também ser robusto para que haja uma alta absorção de impacto em cada ponto de apoio.

Baixo peso.

A estrutura deverá ser leve, permitindo um baixo consumo de energia aquando do fabrico e uma manipulação facilitado.

Baixa complexidade.

O sistema do pescoço deve ser simples, com o menor número possível de componentes permitindo uma transmissão de movimento quase direta. O desenho mecânico deve ser replicável, facilitando a velocidade de construção.

Modular.

O sistema do pescoço deve também ser modular, podendo ser desconectado do resto do corpo de CHARMIE, sem prejudicar o funcionamento do resto do corpo, havendo a possibilidade de sofrer alterações e otimizações, se necessário.

Custo reduzido.

Os elementos da estrutura devem ser produzidos através de impressão 3D.

3.1.3. REQUISITOS DE MATERIAL

Um dos requisitos importantes no desenvolvimento do pescoço de CHARMIE é o material utilizado na estrutura. O Laboratório de Automação e Robótica dispõem de uma Impressora *Makerbot Replicator 2* que utiliza filamento PLA que corresponde a ácido poliláctico.

Neste sentido, a escolha do material dos componentes a fabricar para a estrutura do pescoço deve, se possível, utilizar este material.

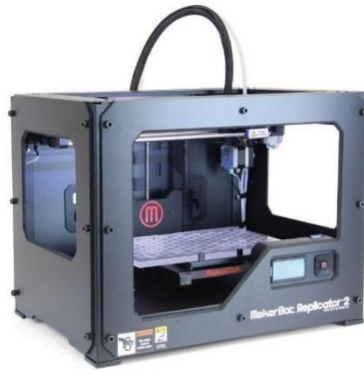


Figura 3.1 – Foto ilustrativa da Impressora *Markerbot Replicator 2* [47].

3.1.4. ESCOLHA DA SOLUÇÃO

A partir dos requisitos e especificações definidos anteriormente, foi possível construir a tabela de objetivos ponderados seguinte, Tabela 3.3.

Nesta foram avaliadas as soluções existentes para pescoços antropomórficos estudadas no capítulo 2.3 em relação aos requisitos especificados anteriormente.

A pontuação final total revela como mecanismo preferido a configuração em série, presente em ambas as soluções ICub c) e IRH. Este tipo de mecanismo destaca-se dos outros, tendo uma melhor performance em características como a baixa complexidade, baixo custo e a sua compatibilidade com os servos fornecidos nos requisitos do sistema.

Tabela 3.3 – Pontuação relativamente aos requisitos específicos de cada solução.

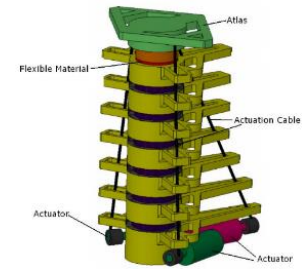
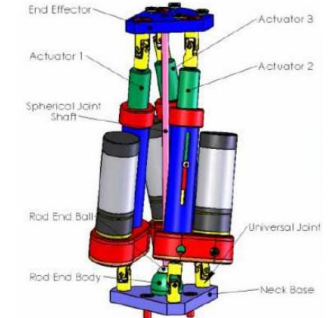
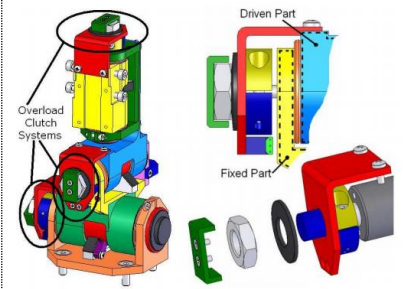
Nome		Baixa complexidade	Seguro	Baixo custo	Anatomicamente concordante	Baixo peso	Adequado aos motores existentes	Modular	GDL	Imagem esquemática	Ref.	Total
iCub	a)	-	-	+/-	++	++	-	++	++		[2], [48]	2
	b)	-	++	+/-	++	++	+	++	++			9
	c)	++	++	++	++	++	+	++	++			15

Tabela 3.3 – Pontuação relativamente aos requisitos específicos de cada solução (continuação).

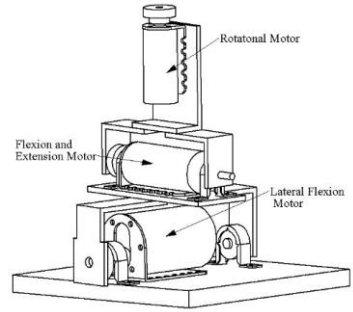
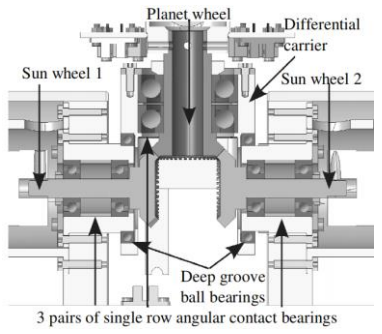
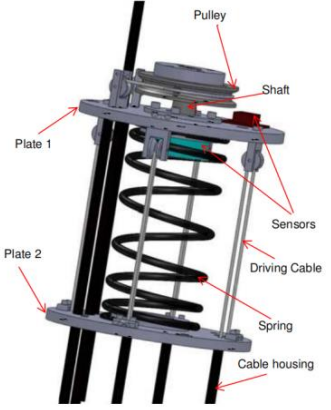
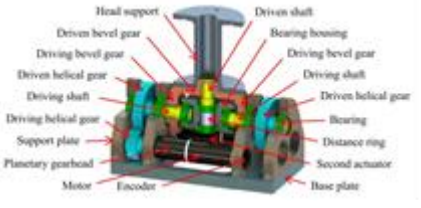
Nome	Baixa complexidade	Seguro	Baixo custo	Anatomicamente concordante	Baixo peso	Adequado aos motores existentes	Modular	GDL	Imagem esquemática	Ref.	Total
IRH	++	++	++	++	++	+	++	++		[3]	15
<i>The humanoid neck</i>	-	++	-	++	-	-	-	+		[17]	-3

Tabela 3.3 – Pontuação relativamente aos requisitos específicos de cada solução (continuação).

Nome	Baixa complexidade	Seguro	Baixo custo	Anatomicamente concordante	Baixo peso	Adequado aos motores existentes	Modular	GDL	Imagem esquemática	Ref.	Total
<i>Low motion noise humanoid head</i>	+/-	++	+/-	+	+/-	-	++	++		[15]	5
<i>Marko</i>	++	++	+	++	+	-	++	++		[14]	11

* Inadequado (-); Fraco (-); Satisfatório (+/-); Bom (+); Excelente (++)

3.2. MODELO CONCEPTUAL

Através do estudo dos requisitos iniciais relativamente aos mecanismos já existentes, foi possível concluir que a melhor opção será uma configuração em série composta por 3 juntas de revolução, cada uma realizando o movimento de *roll*, *pitch* e *yaw*. Este tipo de mecanismo vai permitir a conceção de um pescoço simples, robusto, mas de alta performance.

No Capítulo 3.1.2 foram avaliados os motores a utilizar, uma das características avaliadas foi o seu binário máximo face ao binário máximo necessário para realizar os 3 três graus de liberdade necessários. A conclusão dita a utilização do Servo DF15RMG para a realização do movimento de *yaw* e a utilização dos dois Servos *Dynamixel MX-64T* para a realização dos movimentos de *pitch* e *roll*.

Sabe-se que o binário ou torque de um braço, depende proporcionalmente do tamanho (distância) desse mesmo braço, (5). Por isso, para evitar a realização de binários mais elevados que o necessário, os servos que necessitam de efetuar momentos mais elevados (neste caso os servos de *pitch* e *roll*), serão posicionados mais perto da cabeça (câmara *3D D455 Intel Realsense*) diminuindo a sua distância, d , ao final do braço.

$$M = Fd \quad (5)$$

Onde, M é o momento em Nm, F , é a intensidade da força em N e d , é a distância em m.

Neste capítulo, serão abordados dois modelos conceptuais realizados através do *software SolidWorks 2019*. Apesar do primeiro modelo ser mecanicamente coerente e seguir os requisitos iniciais do sistema, posteriormente, não foi possível realizar o controlo dos servos *Dynamixel MX-64T* em *Arduino*, o que originou a necessidade da modelação e construção de uma nova estrutura para o pescoço de CHARMIE. O modelo final utiliza três Servos DF15RMG.

De realçar que, em ambos os modelos conceptuais, os componentes passaram por várias iterações, no entanto apenas serão exibidas as iterações finais.

Os desenhos técnicos de apoio das peças finais estão exibidos no Apêndice I.

3.2.1. PRIMEIRO MODELO

Começando pela base, foi modelado uma peça de encaixe com o primeiro servo (servo DF15RMG) e com o disco rotativo. Na Figura 3.2 é possível observar a peça modelada em (a) bem como o encaixe, em (b).

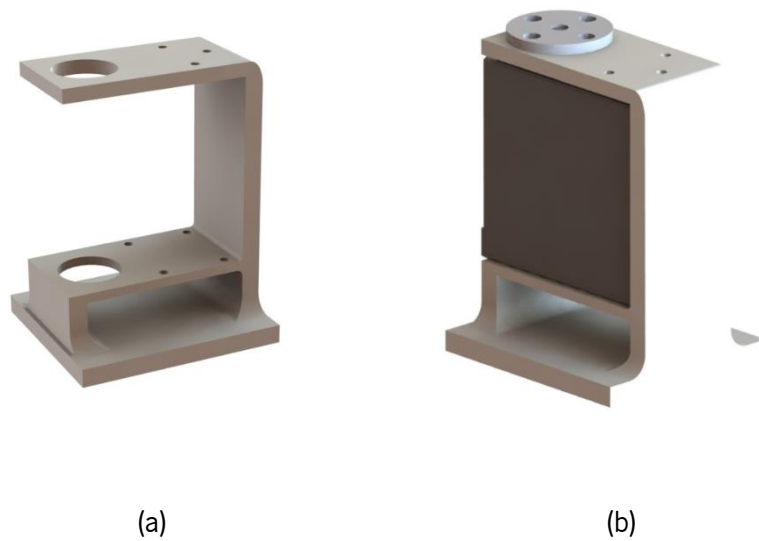


Figura 3.2 – (a) Modelação da base do pescoço, encaixe para o servo que realiza o *yaw*; (b) Modelação do encaixe do servo DF15RMG na base e no disco rotativo.

De seguida, foi necessário conectar a peça da base com o próximo servo, neste caso, o que realiza o movimento de *roll*. Com esse intuito, usou-se como base uma peça de encaixe já existente no mercado para encaixe entre dois servos *Dynamixel MX-64T*, nomeadamente FR05-S101 presente na Figura 3.3, e alterou-se os furos para que correspondessem aos furos do disco rotativo em Figura 3.2 (b). A peça final está representada na Figura 3.5 (a).

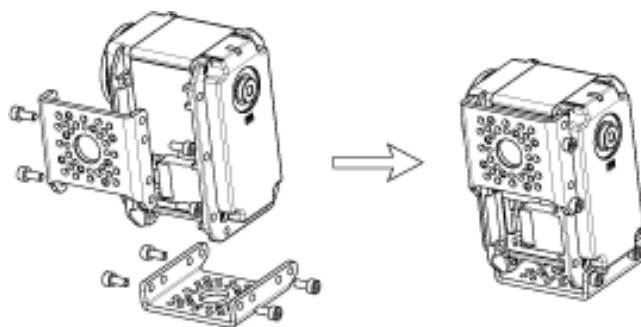


Figura 3.3 – Representação esquemática do encaixe da peça FR05-S101 no servo Dynamixel MX-64T [49].

Relativamente à peça da Figura 3.5(b), esta também foi inspirada numa peça já existente para o *Dynamixel MX-64T*, a FR05-H101 (Figura 3.4), no entanto, a altura desta peça foi reduzida relativamente à original (de 32,5 mm para 26,64 mm), para que a altura do pescoço não divergisse da altura anatómica normal de um pescoço. A Figura 3.5 (c) exhibe a modelação do encaixe destas duas peças no servo.

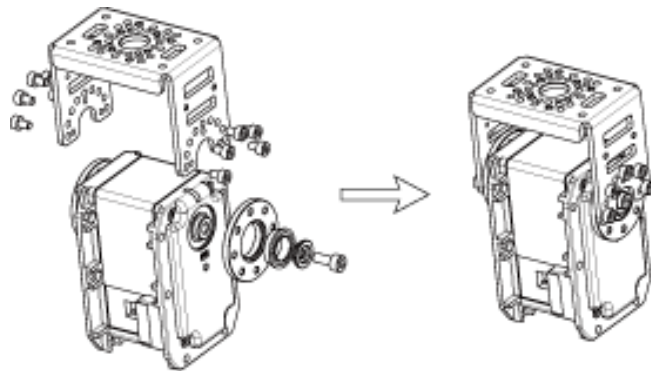


Figura 3.4 - Representação esquemática do encaixe da peça FR05-H101 no servo Dynamixel MX-64T [53].

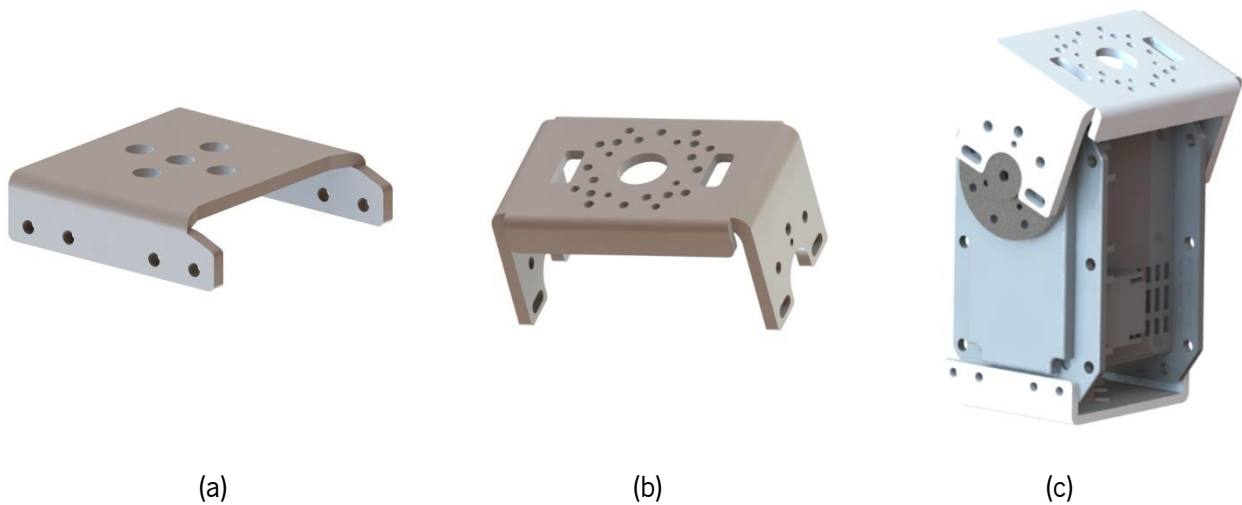


Figura 3.5 – (a) Modelação do encaixe inferior, furos centrais compatíveis com o disco rotativo da base; (b) Modelação do encaixe superior; (c) Modelação do encaixe superior e inferior no servo Dynamixel MX-64T.

O último servo realiza o movimento de *pitch* e situa-se no topo do pescoço, a ligação deste com o servo anterior foi feita através da peça FR05-S101, já apresentada na Figura 3.3. Foi, também, necessária a modelação de um suporte para a Câmara *3D D455 Intel Realsense* que se encaixa no servo, as Figura 3.6 (a) e (b) apresentam a parte frontal do suporte da câmara e a parte traseira (tampa) respetivamente, a Figura 3.6 (c) exhibe a modelação do encaixe final.

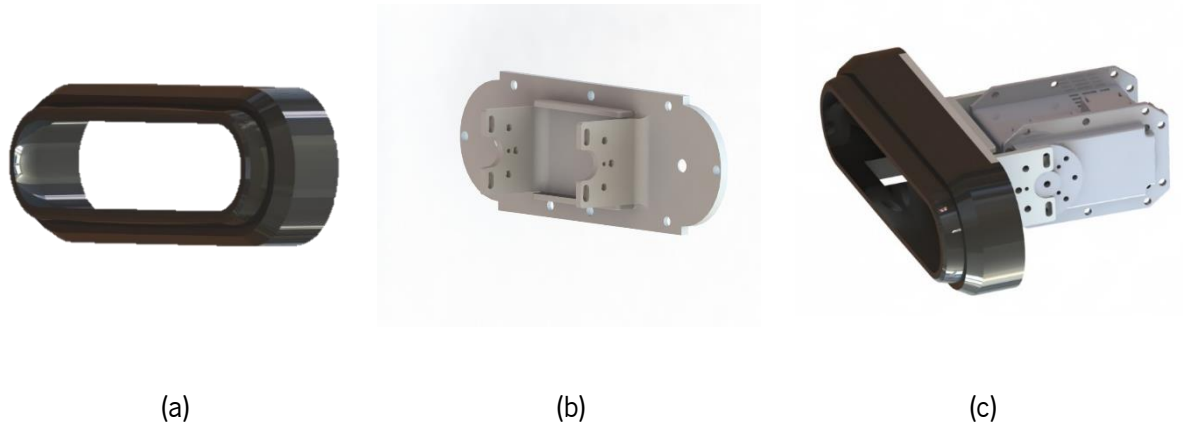


Figura 3.6 – (a) Modelação da parte frontal do suporte da câmara *3D D455 Intel Realsense*; (b) Modelação da tampa do suporte da câmara *3D D455 Intel Realsense* com encaixe para os discos rotativos do servo *Dynamixel MX-64T* (c) Modelação do encaixe.

Através da junção destas três partes, obtém-se a montagem final do pescoço. A modelação desta montagem está representada na Figura 3.7, a realização desta permitiu verificar a concordância dos encaixes, de modo à realização da impressão 3D das peças. Apresenta um total de três graus de liberdade e três juntas ativas. A sua massa total é de 0,420 Kg e uma altura de 185 mm.

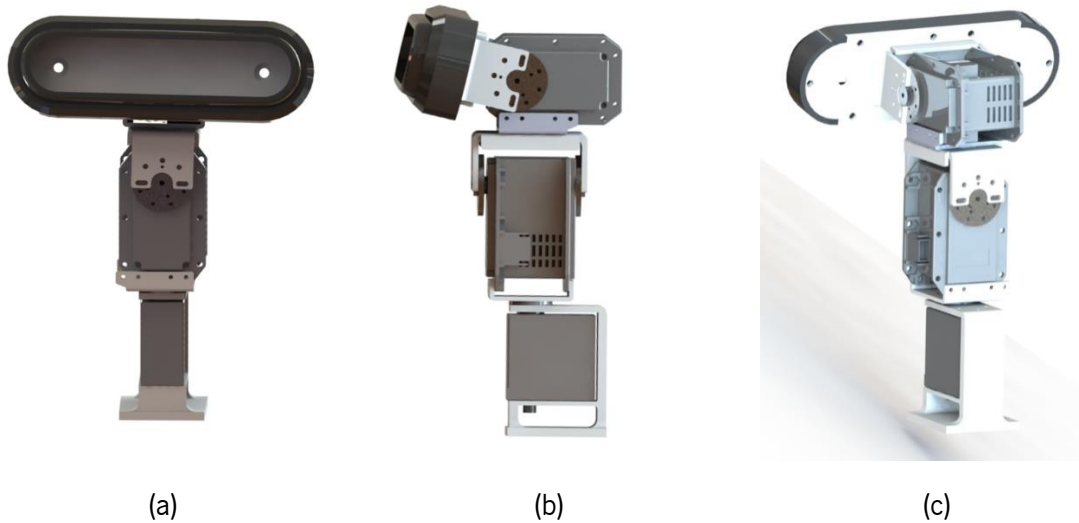


Figura 3.7 – Modelação do encaixe total do pescoço; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva da traseira.

Quando comparado com as proporções anatómicas na Tabela 2.3, é possível observar que o comprimento médio de um pescoço humano é de 106 mm, pelo que o erro relativo será de 75%. Para colmatar este erro relativo, aquando da montagem do pescoço no tronco de CHARMIE, este deve ser embutido no peito 79 mm.

Além do comprimento elevado, a integração dos dois motores *Dynamixel MX-64T* com o *Arduíno* não é direta, visto que estes motores não estão adequados às especificações do *Arduíno*, apesar de tentativas, usando métodos de compatibilidade, esta ligação não foi conseguida com sucesso, e, portanto, o controlo destes dois em conjunto com o Servo DF15RMG não foi possível. Em consequência, foi modelada uma nova estrutura, utilizando três servos DF15RMG, pois estes apresentam compatibilidade direta com o *Arduíno*.

3.2.2. MODELO FINAL

Apesar dos servos DF15RMG apresentarem menos binário que os servos *Dynamixel MX 64T*, o seu binário continua a ser suficiente para acarretar os esforços necessários ao movimento dos 3 graus de liberdade do pescoço. Tanto os valores de binário do servo DF15RMG como os dos movimentos de *roll*, *pitch* e *yaw* são apresentados no capítulo 3.1.2.

Após a montagem do primeiro modelo, foi concluído que a peça utilizada na base não permitia o encaixe total do disco rotativo, pelo que a peça base foi alterada ligeiramente para o modelo da Figura 3.8.

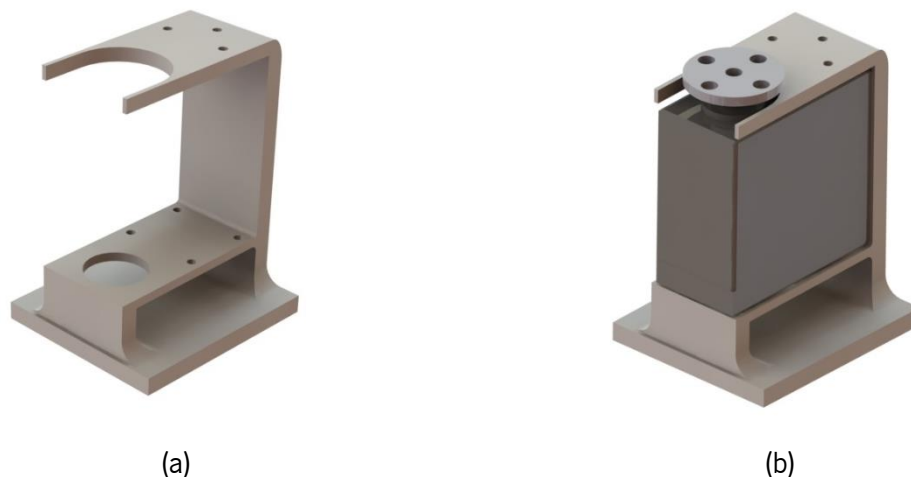


Figura 3.8– (a) Modelação da base do pescoço, encaixe para o servo que realiza o *yaw*, (b) Modelação do encaixe do servo DF15RMG na base e no disco rotativo.

Para a realização do encaixe do servo do movimento de *roll* com a base, tirou-se partido das peças existentes no mercado para o servo DF15RMG, nomeadamente “*Short U-sharp servo bracket*” e “*Long U-sharp servo bracket*” representadas na Figura 3.9.

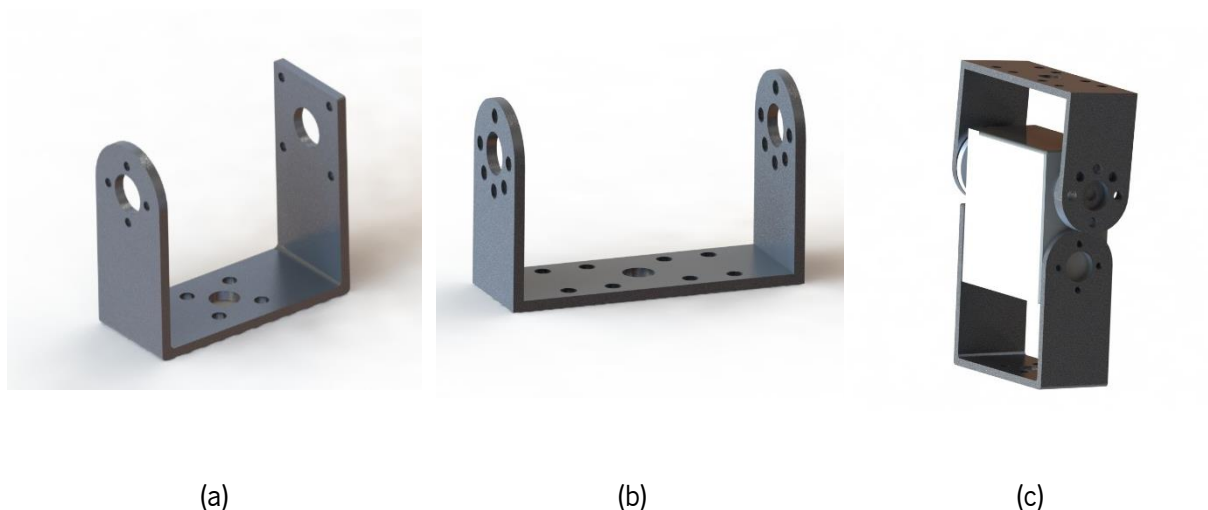


Figura 3.9 – (a) Modelação do encaixe inferior - *Short U-sharp servo bracket*, (b) Modelação do encaixe superior - *Long U-sharp servo bracket*; (c) Modelação do encaixe superior e inferior no servo DF15RMG.

Relativamente ao terceiro e último servo, responsável pelo pitch, apenas foi alterada a tampa do suporte da câmara *3D D455 Intel Realsense*, que apresentava um encaixe compatível com os discos rotativos o *Dynamixel MX-64T*. A nova tampa apresenta um encaixe compatível com os discos rotativos do servo DF15RMG (Figura 3.10(b)), para além disso, foi adicionado mais um “*Short U-sharp servo bracket*”, na zona inferior do servo, para permitir o encaixe com o servo que realiza o *rol* (Figura 3.10 (c)).

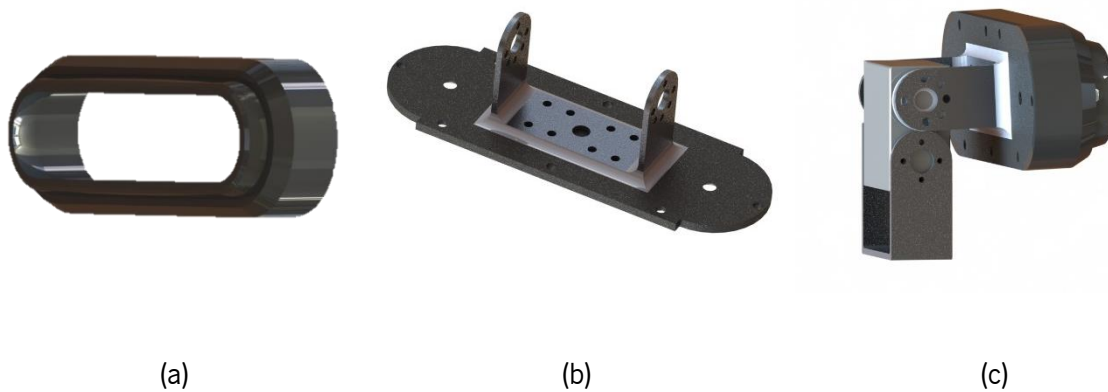


Figura 3.10 - (a) Modelação da parte frontal do suporte da câmara *3D D455 Intel Realsense*; (b) Modelação da tampa do suporte da câmara *3D D455 Intel Realsense* com encaixe para os discos rotativos do servo DF15RMG (c) Modelação do encaixe.

A modelação do encaixe final está apresentada na Figura 3.11, confirmando a veracidade dos encaixes modelados. A estrutura tem uma altura de 175,5 mm e uma massa de 0,44 kg. Relativamente à modelação anterior, esta exhibe menos peças com necessidade de manufatura por impressão 3D, além de uma altura inferior, o que se demonstra vantajoso.

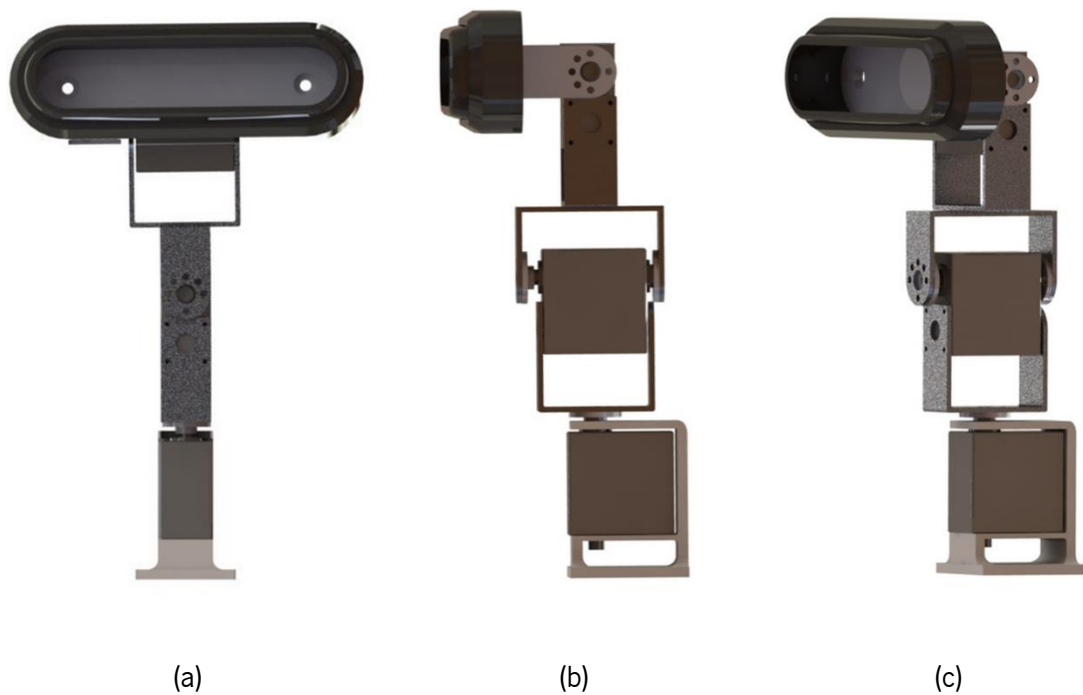


Figura 3.11 - Modelação do encaixe total do pescoço; (a) Vista de frente; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspetiva.

3.3. CONSTRUÇÃO DO PESCOÇO

Tendo a modelação das peças do pescoço concluída, o próximo passo foi a construção do pescoço. Neste caso, o processo de manufatura das peças necessárias foi impressão 3D, devido ao seu baixo custo, rapidez e versatilidade. Quanto aos componentes comprados estes incluem, o *Short U-sharp servo bracket* e *Long U-sharp servo bracket* já mencionados no subcapítulo anterior, os servos utilizados bem como os seus discos rotativos, os parafusos utilizados e a câmara 3D D455 *Intel Realsense*. Por razões de testes, a base da peça base foi aumentada para oferecer mais estabilidade ao pescoço, já que este ainda não estaria acoplado ao tronco.

O pescoço apresenta um atravancamento com um comprimento de 135,5 mm, uma largura de 90 mm e uma altura de 175,5 mm. A sua massa é de 0,44kg. O erro relativo entre a altura média de um pescoço humano (presente na Tabela 3.1) e o comprimento do pescoço de CHARMIE é 65,6%. É recomendado que na montagem do pescoço no tronco de CHARMIE, este seja embutido 69,5 mm.

A Tabela 3.4 apresenta todos os componentes utilizados na construção do pescoço antropomórfico de CHARMIE, assim como as características mais relevantes, como quantidade, material, processo de manufatura, proporções e massa.

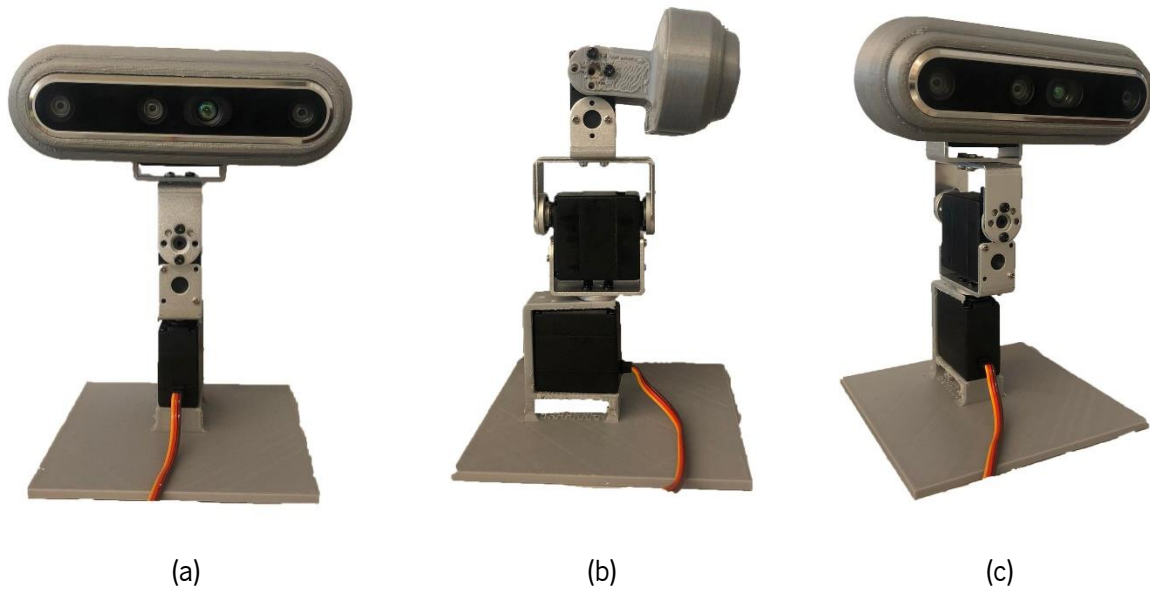


Figura 3.12 – Construção final do pescoço; (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; (c) vista em perspectiva.

Tabela 3.4 – Tabela de componentes e características do pescoço

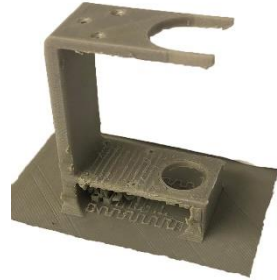
Componente	Qtd.	Material	Processo de manufatura	Atravancamento (mm)(<i>c</i> x <i>l</i> x <i>h</i>)	Massa (g)	Foto
Base	1	Ácido polilático (PLA)	Impressão 3D	45 x 40 x 59,5	11	
<i>Short U-sharp servo bracket</i>	2	Liga de alumínio	Corte laser e quinagem	40 x 20 x 25	9	
<i>Long U-sharp servo bracket</i>	1	Liga de alumínio	Corte laser e quinagem	55,6 x 20 x 35	11	

Tabela 3.6 – Tabela de componentes e características do pescoço (continuação).

Componente	Qtd.	Material	Processo de manufatura	Atravancamento (mm)(<i>c</i> x <i>l</i> x <i>h</i>)	Massa (g)	Foto
Tampa do suporte da câmara	1	Ácido polilático (PLA)	Impressão 3D	135,50 x 46,50 x 3	19	
Suporte da Câmara	1	Ácido polilático (PLA)	Impressão 3D	141,50 x 46,50 x 27,5	22	
Servo DF15RMG	1	NA	NA	20 x 40 x 40	64	
Câmara 3D <i>D455 Intel Realsense</i>	1	NA	NA	26 x 124 x 29	100	 [41]

Tabela 3.6 – Tabela de componentes e características do pescoço (continuação).

Componente	Qtd.	Material	Processo de manufatura	Atravancamento (mm)(<i>c</i> x <i>l</i> x <i>h</i>)	Massa (g)	Foto
Disco Rotativo Servo DF15RMG	5	Liga de Alumínio	Corte laser	20 x 2,48	2	
Parafuso de rosca M2,6x8	19	NA	NA	NA	0,12	
Parafuso M3x8	24	NA	NA	NA	0,35	
Parafuso M2,5	4	NA	NA	NA	0,38	
Porca hexagonal M2,5	4	NA	NA	NA	0,24	
Total	NA	NA	NA	135,5 x 90 x 175,5	440	

3.4. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Através do projeto mecânico, foi possível retirar algumas ilações. Relativamente aos requisitos iniciais, concluiu-se que por meio da enumeração e descrição dos constrangimentos e requisitos existentes, a escolha do mecanismo do pescoço revelou-se simples e rápida.

No que diz respeito ao modelo conceptual, a modelação e idealização deste antes da sua construção, facilitou o processo iterativo de otimização dos componentes. Uma ferramenta valiosa nesta fase de projeto foi a utilização da função de *Assembly* no ambiente *SolidWorks*, permitindo validar os encaixes modelados.

Apesar dos obstáculos encontrados em relação ao controlo dos Servos Dynamixel MX-64T, a utilização de *software* como o *Solidworks* proporcionou um rápido restabelecimento do curso das tarefas e calendarização.

Na construção do pescoço, é de notar que, na generalidade, os componentes são constituídos por alumínio e PLA, o polímero utilizado na impressão 3D, o que permitiu manter uma baixa massa do conjunto.

O protótipo final do pescoço apresenta-se como uma solução robusta para o problema inicial, apesar do seu comprimento ser mais elevado que o desejado, o desvio pode ser colmatado aquando da montagem do pescoço no tronco de CHARMIE.

4. CONTROLO DO PESCOÇO

Tendo a estrutura do pescoço construída, é necessário implementar o controlo que tem como objetivo a deteção e rastreamento de objetos. O controlo do pescoço de CHARMIE é definido por duas etapas principais, interligando conhecimentos de dois domínios, visão por computador e Arduino. Na presente dissertação, apesar do pescoço de CHARMIE ser composto por 3 servos capazes de realizar 3 graus de liberdade, apenas serão utilizados os servos responsáveis pelo movimento de *yaw* e *pitch*. Isto deve-se à conclusão de que, com apenas a utilização dos servos que realizam movimento no eixo do *x* e do *y*, é possível a realizar o rastreamento da posição de um objeto. A utilização do servo que realiza o movimento de *roll* apenas se revelaria importante caso fosse necessário seguir a orientação de um objeto.

A Figura 4.1 apresenta um esquema do funcionamento do controlo de CHARMIE. O pescoço movimenta-se recolhendo informações da câmara, no topo do pescoço, sobre a localização e movimentação do objeto a detetar/rastrear, estas serão processadas pelo algoritmo de visão que as transforma em mensagens que incluem o número de graus a movimentar por cada servo e qual a direção axial que se devem mover (esquerda, direita, cima ou baixo). As mensagens para o Arduino que movimentará os servos motores existentes apropriadamente. A cada instante existe uma realimentação desta informação.

A realização de um estudo adequado do controlo do pescoço requer uma boa definição do sistema considerado. Por isso, este capítulo inicia com a definição do sistema de coordenadas do pescoço, seguido do cálculo da cinemática direta e do espaço de trabalho que se ocupam da descrição dos movimentos das juntas dos corpos.

Os subcapítulos seguintes debruçam-se na elucidação do algoritmo utilizado na visão por computador da câmara e do algoritmo utilizado no Arduino, bem como a coordenação dos dois. A consulta dos algoritmos pode ser feita através do Apêndice II.

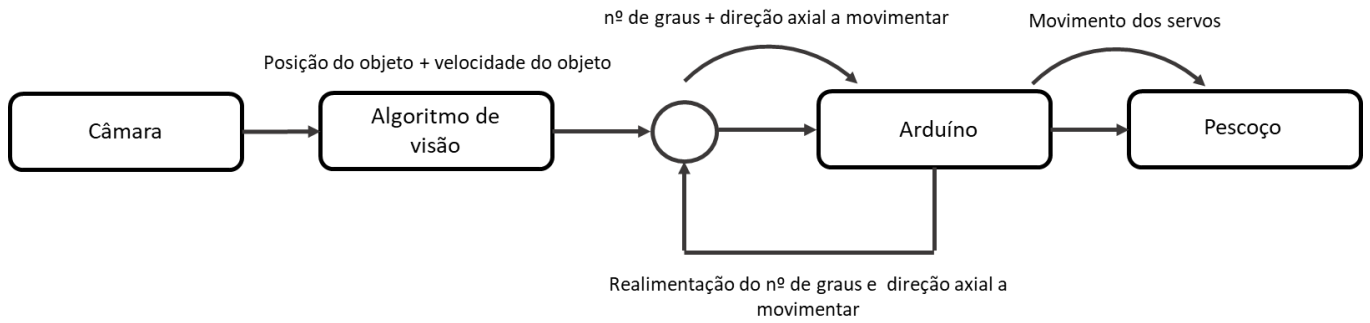


Figura 4.1 – Esquema representativo do funcionamento do controlo de CHARMIE.

4.1. SISTEMA DE COORDENADAS

A definição de um sistema global de coordenadas é essencial para um estudo do controlo de um mecanismo claro e conciso. Por razões de cálculo, foi considerado que todos os segmentos apresentam o seu centro de massa no ponto médio entre as duas juntas. A Figura 4.2 exibe uma representação esquemática do pescoço desenvolvido apresentando os referenciais acoplados a cada corpo.

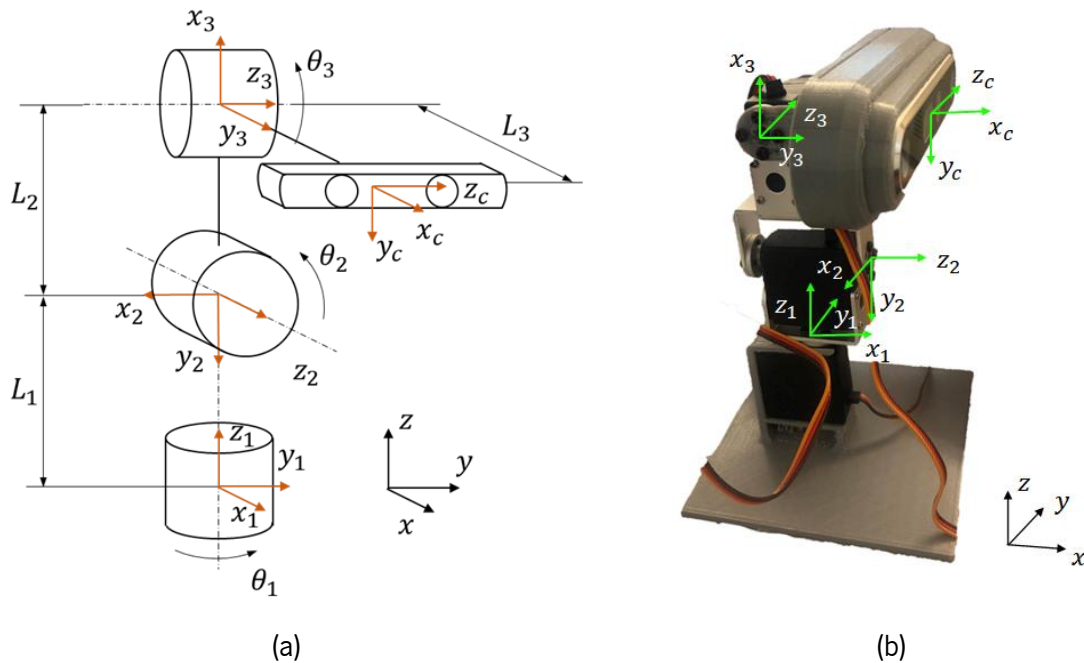


Figura 4.2- Representação dos referenciais relativos utilizados na cinemática direta; (a) a partir de um esquema; (b) No pescoço.

De realçar que a primeira junta realiza o movimento de *yaw*, com um alcance mínimo de -100° e máximo de 100° , a segunda junta realiza o movimento de *roll* e apresenta um alcance mínimo de $-63,5^\circ$ e máximo de $63,5^\circ$ e a terceira e última junta realiza o movimento de *pitch* exibindo um alcance mínimo -71° e máximo de 103° . Em relação aos comprimentos, estes apresentam: $L_1 = 45$ mm, $L_2 = 65$ mm e $L_3 = 25$ mm.

4.2. CINEMÁTICA DIRETA

A cinemática direta permite determinar a relação entre o valor angular de cada articulação e a posição dos apoios [50]. Na Figura 4.2 é possível observar a representação dos referenciais das transformações individuais relativas utilizadas no cálculo da cinemática direta.

Recorrendo à formulação de *Denavit-Hartenberg*, já descrita no capítulo 2.4.1, é possível descrever as transformações relativas entre os referenciais, obtendo os parâmetros exibidos na Tabela 4.1 .

Tabela 4.1 – Parâmetros de rotação e translação de *Denavit-Hartenberg*.

Transformação	Translação em X (a_{i-1})	Rotação em X (α_{i-1})	Translação em Z (d_i)	Rotação em Z (θ_i)
$\{0\} \rightarrow \{1\}$	0	-90	L_1	θ'_1
$\{1\} \rightarrow \{2\}$	L_2	90	0	θ'_2
$\{2\} \rightarrow \{3\}$	L_3	0	0	θ'_3

Em que:

$$\theta'_1 = \theta_1 - 90^\circ \quad (6)$$

$$\theta'_2 = \theta_2 - 90^\circ \quad (7)$$

$$\theta'_3 = \theta_3 + 90^\circ \quad (8)$$

As matrizes de transformação obtidas através da (2) estão representadas nas (9), (10), (11), o seu produto deu origem à matriz de transformação total da (12).

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta'_1) & -\sin(\theta'_1) \cos(\theta'_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta'_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta'_2) & -\sin(\theta'_2) \cos(\theta'_2) & \sin(\theta'_2) & L_2 \cos(\theta'_2) \\ \sin(\theta'_2) & 0 & -\cos(\theta'_2) & L_2 \sin(\theta'_2) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) \cos(\theta_3) & 0 & L_3 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & L_3 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^0\mathbf{T}_3 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} c(\theta'_1) c(\theta'_2) c(\theta_3) - s(\theta'_1) s(\theta'_3) & -s(\theta'_1) c(\theta'_3) - c(\theta'_1) c(\theta'_1) s(\theta'_3) & c(\theta'_1) s(\theta'_2) & L_2 c(\theta'_1) c(\theta'_2) - L_3 s(\theta'_1) s(\theta'_3) + L_3 c(\theta'_1) c(\theta'_2) c(\theta'_3) \\ c(\theta'_1) s(\theta'_3) + c(\theta'_2) \cdot \sin(\theta'_1) c(\theta'_3) & c(\theta'_1) c(\theta'_3) - c(\theta'_2) s(\theta'_1) s(\theta'_3) & s(\theta'_1) s(\theta'_2) & L_3 c(\theta'_1) s(\theta'_3) + L_2 c(\theta'_2) \cdot s(\theta'_1) + L_3 c(\theta'_2) s(\theta'_1) c(\theta'_3) \\ -s(\theta'_2) c(\theta'_3) & s(\theta'_2) s(\theta'_3) & c(\theta'_2) & L_1 - L_2 s(\theta'_2) - L_3 s(\theta'_2) c(\theta'_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A matriz transformada final apresenta as equações para o cálculo da posição do *end effector*, neste caso câmara no topo do pescoço, de acordo com os ângulos desejados das juntas. As equações são as seguintes:

$$x_e = L_2 \cos(\theta'_1) \cos(\theta'_2) - L_3 \sin(\theta'_1) \sin(\theta'_3) + L_3 \cos(\theta'_1) \cos(\theta'_2) \cos(\theta'_3) \quad (13)$$

$$y_e = L_3 \cos(\theta'_1) \sin(\theta'_3) - L_2 \cos(\theta'_2) \sin(\theta'_1) + L_3 \cos(\theta'_2) \cos(\theta'_3) \sin(\theta'_1) \quad (14)$$

$$z_e = L_1 - L_2 \sin(\theta'_2) - L_3 \cos(\theta'_3) \sin(\theta'_2) \quad (15)$$

É, também, possível averiguar a direção da cabeça (câmara), através da análise da primeira coluna da matriz transformação que nos dá indicação da direção do eixo do x , em relação ao referencial base. Por exemplo, se usarmos a posição normal do pescoço, isto é, todos os θ 's iguais a zero graus, as coordenadas do eixo do x , em relação ao referencial base, são $N(1,0,0)$.

O que significa que o pescoço se encontra na posição representada na Figura 4.2. Por outro lado, se considerarmos que θ_1 é igual a 90° e os restantes são iguais a zero, então as coordenadas do eixo do x serão iguais a $N(0, 1, 0)$.

O que significa que o eixo do x da cabeça se encontra agora no lugar do eixo do y dos referenciais da base, o que faz sentido, visto que a cabeça virou 90° apenas na primeira junta de revolução. Na Figura 4.3, podemos observar esta transformação e os referenciais da base e da cabeça.

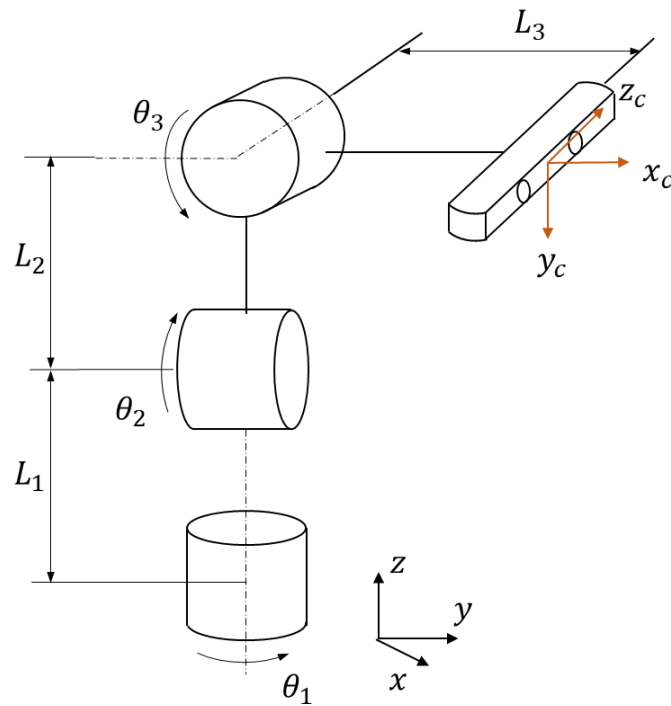


Figura 4.3 – Referenciais do pescoço de CHARMIE após revolução de 90° na primeira junta.

Utilizando esta lógica, é possível analisar qualquer que seja a direção da cabeça, apenas através da matriz transformação.

4.2.1. ESPAÇO DE TRABALHO

O espaço de trabalho de um robô manipulador é definido como um conjunto de pontos que podem ser alcançados pelo seu terminal, este vai depender do tamanho dos segmentos e dos limites angulares das juntas.

Para o cálculo do espaço de trabalho, foi utilizado um algoritmo em *Python*, onde se produz um gráfico 3D com o espaço de trabalho do pescoço do CHARMIE, como se pode ver na Figura 4.4.

Para o efeito, foram adicionados os requisitos de movimento antropomórfico, nomeadamente os ângulos máximos e mínimos de cada junta (*roll*, *pitch* e *yaw*) presentes na Tabela 3.1.

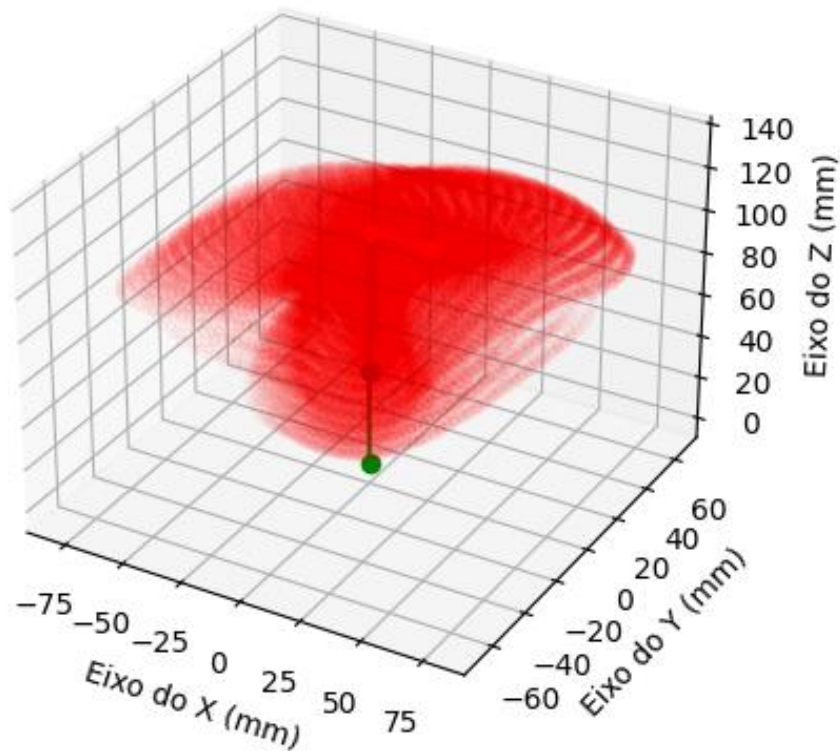


Figura 4.4 – Espaço de trabalho do pescoço de CHARMIE.

4.3. ALGORITMO DE VISÃO

Para a deteção, rastreamento e determinação da posição de objetos foram utilizadas técnicas de visão por computador. Foi utilizada a linguagem *Python* no ambiente *PyCharm*, um ambiente de desenvolvimento integrado que fornece uma boa interface para desenvolvimento de algoritmos em *Python*, com especial foco na biblioteca *OpenCV*, que contém os comandos mais relevantes aquando de aplicações de visão por computador. Os comandos mais relevantes para o presente trabalho estão apresentados no Capítulo 2.4.2 a sua aplicação será explorada neste capítulo.

Para além do processamento da imagem recebida na visão por computador, para o controlo do pescoço é necessário conseguir transmitir a informação recolhida ao Arduino. Assim, o algoritmo de visão inclui também a utilização da biblioteca *PySerial*, que fornece suporte para conexões seriais numa variedade de dispositivos diferentes [51], sendo um deles o Arduino.

Na Figura 4.5 está apresentado o esquema lógico das operações realizadas no algoritmo de visão do pescoço do CHARMIE. As operações a castanho dizem respeito à utilização de técnicas de visão por computador, enquanto as operações em azul, dizem respeito à utilização de comando associados à biblioteca *PySerial*. Por uma questão de simplicidade, neste capítulo os dois tipos de operações serão explicados separadamente.

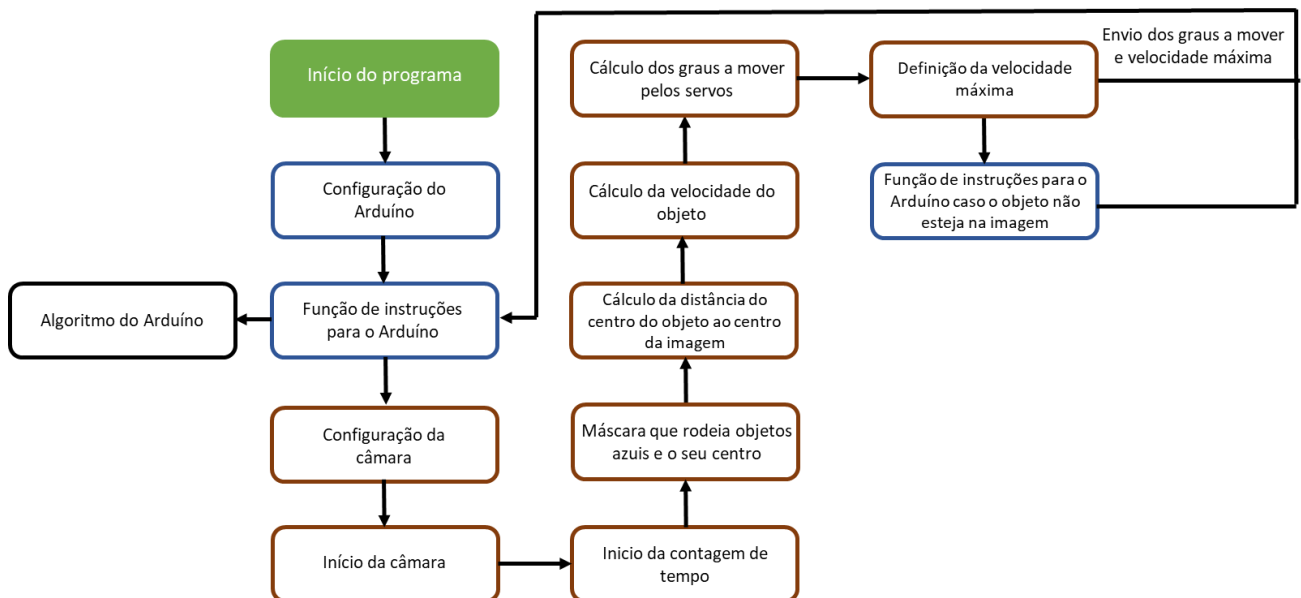


Figura 4.5 – Esquema lógico do algoritmo de visão do pescoço de CHARMIE.

4.3.1. PROCESSAMENTO DE IMAGEM E VISÃO POR COMPUTADOR

Começando pela configuração da câmara, sendo esta a câmara 3D D455 *Intel Realsense*, foi necessário a utilização dos comandos da biblioteca *pyrealsense2*, criada especificamente para este tipo de aplicações. Esta inclui a configuração dos fluxos de profundidade e cor e a configuração da resolução da imagem.

O início da contagem do tempo é feito de seguida, para que possa ser utilizada na obtenção da velocidade da bola e a velocidade máxima.

Posteriormente, inicia-se o processamento da imagem, com a utilização dos comandos de *OpenCV*, este contém as etapas representadas na Figura 4.6, para melhor compreensão é recomendada a leitura do Capítulo 2.4.2. O produto final desta etapa é uma máscara que distingue os objetos azuis e os rodeia, evidenciado o seu centro e sendo possível obter as coordenadas deste a cada instante.

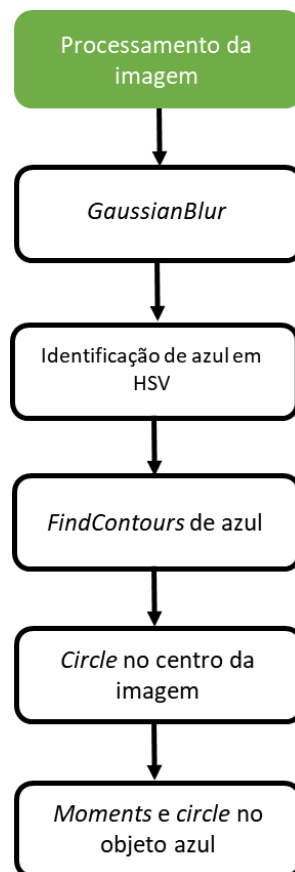


Figura 4.6 - Esquema lógico do algoritmo que realiza o processamento de imagem.

Através das informações retiradas por visão por computador, é calculada a distância do centro do objeto ao centro da imagem em cada instante no eixo do x e do y , (d_x e d_y) e a distância do centro do objeto atual ao centro do objeto na imagem/posição anterior, também no eixo do x e do y . Este segundo valor é dividido pelo tempo, t , gerando a velocidade do objeto a cada instante para o eixo do x e do y (v_x e v_y).

São então introduzidas no algoritmo duas equações de posição e velocidade ((16) e (17)), em que a sua solução é igual ao número de graus a movimentar pelos servos de *yaw* (eixo do x) e *pitch* (eixo do y).

Para obter tal solução, foi necessário encontrar um valor coerente para as constantes K_1 , K_2 , K_3 e K_4 .

$$\alpha_x = K_1 \cdot d_x + K_2 \cdot v_x \quad (16)$$

$$\alpha_y = K_3 \cdot d_y + K_4 \cdot v_y \quad (17)$$

Os valores de K_1 , K_2 , K_3 e K_4 foram obtidos por um processo iterativo de testes experimentais, que serão apresentados em mais detalhe no capítulo 4.5. Os valores das constantes conseguidos são os seguintes:

$$K_1 = 0,03$$

$$K_2 = 0,0043$$

$$K_3 = 0,03$$

$$K_4 = 0,0043$$

Por fim, como abordado no capítulo 3.1.1, a velocidade máxima natural de um pescoço humano é de 342°/s, o que significa que o ângulo máximo possível de movimentar em cada espaço de tempo em que é enviada uma instrução é igual a:

$$\max_{\alpha} = 342 \cdot t \quad (18)$$

Esta equação foi adicionada ao algoritmo bem como a condição de que ambos α_x e α_y não devem ultrapassar max_α . Se isto acontecer o ângulo a movimentar passa a ser igual a max_α .

4.3.2. LIGAÇÃO COM O ARDUÍNO

No que diz respeito às operações de ligação com o Arduino das informações recolhidas na visão por computador, através da utilização da biblioteca *PySerial*, tem-se como primeira etapa a introdução das configurações do Arduino. Estas configurações consistem na criação da variável serial, identificação da porta serial que vai ser usada para a comunicação, neste caso “COM8”, introdução do *baud rate*, que corresponde ao ritmo a que a informação é transferida no canal de comunicação, que será 9600bps e, por fim, a abertura da comunicação serial.

De seguida, é construída a função que vai receber as informações da visão e transmiti-las através de comunicação serial para o Arduino. Esta função apresenta-se como um conjunto de declarações “*if*”.

Na Figura 4.7 estão representados o sistema de eixos que a biblioteca *OpenCv* utiliza (estes não estão representados aquando da utilização normal do programa), como é possível de observar o eixo do x aumenta na direção da direita e o eixo do y aumenta para baixo. Isto significa que, quando α_x é positivo, o objeto está a movimentar para a direita e quando é negativo, está a movimentar a esquerda. O mesmo raciocínio aplica-se para α_y , quando este é positivo, o objeto está a movimentar-se para baixo e quando é negativo, o movimento do objeto é ascendente.

Assim, como também representado na Figura 4.7, através das declarações “*if*”, foi delimitada uma área de 400 pixéis à volta do centro da imagem, onde o centro do objeto deve sempre constar. Se o objeto sair da zona limite, no eixo do x e/ou no do y será enviada para uma mensagem, para o Arduino, com o valor de absoluto de α_x e /ou α_y juntamente com um indicativo em forma de *string* da direção para onde este se move. Por exemplo, a mensagem “*r10*” significa que o motor do eixo do x se deve movimentar 10 graus para a direita. A mensagem é enviada para o Arduino utilizando o comando *encode*.

Para além disso, se o valor absoluto de α_x e /ou α_y for superior à max_α , o número de graus enviado passa a corresponder max_α , já que um número de graus superior a este máximo implicaria uma velocidade maior do que aquela que é possível anatomicamente.

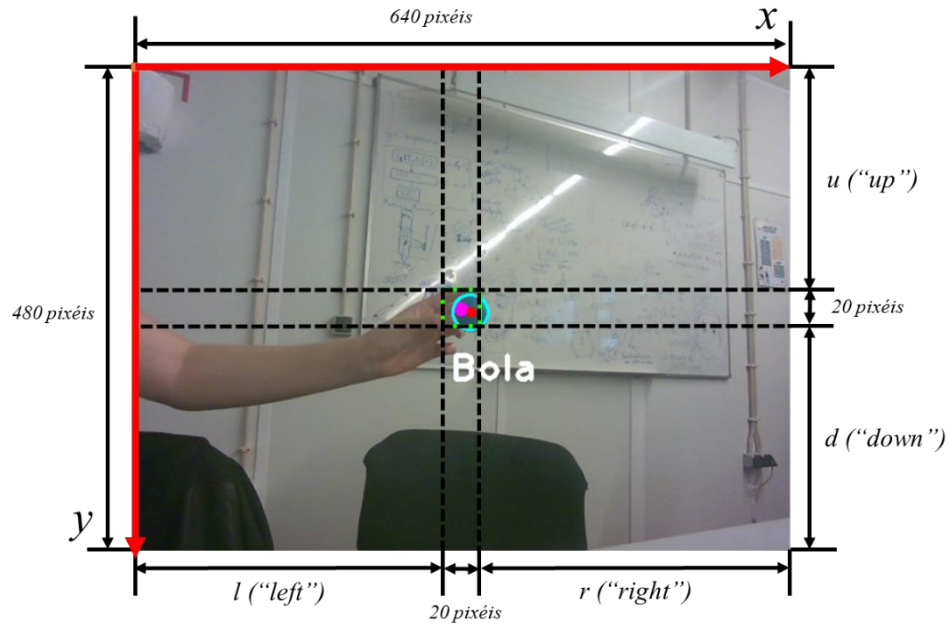


Figura 4.7 – Representação esquemática das declarações “if” aplicadas na função de instruções para o Arduino.

Por último, caso o objeto não se encontre na imagem, existe uma função no final do algoritmo que enviará para o Arduino um conjunto de instruções para que o pescoço procure a bola, movimentando-se em todas as direções com uma ordem específica.

Esta função é também constituída por declarações “if” e utiliza as mesmas denominações, para a esquerda, direita, cima e baixo da imagem.

A função começa por estabelecer que, se a posição do pescoço no eixo do x for maior que 100° , então este andará primeiro para a esquerda até aos 190° , depois subirá até aos 107° , utilizando o servo do eixo do y . Se a posição no eixo do x do pescoço for menor que 100° então este moverá para a direita, até aos 10° , e de seguida, descenderá até aos 20° . O processo repete-se até que o objeto seja visível na imagem.

4.4. ARDUÍNO

Para que as mensagens do algoritmo de visão fossem lidas corretamente e transmitidas do Arduino para os servos, foi necessário criar um algoritmo/programa para este. Para isso foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado existente para este dispositivo que se baseia em programação C/C++ e a biblioteca “servo.h” fornecida pelo Arduino, que apresenta comandos para controlo de servos.

Na Figura 4.8 é possível observar a representação esquemática do programa construído. O primeiro passo é a configuração dos servos, que contém a nomeação destes (servoX e servoY), introdução do seu *BaudRate* (9600bps, igual ao configurado no algoritmo da visão), estabelecimento da sua posição inicial e declaração do número dos pinos a que cada servo se encontra ligado, no Arduino.

Depois da verificação e leitura da informação, segue-se um conjunto de declarações “if” que levam ao movimento do servoX e/ou do servoY o número de graus de α_x e /ou α_y .

Este programa abrange ainda as mensagens enviadas caso o objeto não se encontre na imagem e caso a mensagem enviada não seja válida.

Como abordado no capítulo 3.1.1, o pescoço apresenta um alcance mínimo e máximo de graus, o que significou incluir estas restrições naturais no movimento dos servos. No caso do servoX, este apenas se poderá mover dos -100° aos 100° e o servoY, dos $-63,5^\circ$ aos $63,5^\circ$.

Por fim, as ligações do pescoço com o Arduino e computador foram realizadas, a Figura 4.9 demonstra as ligações realizadas. Para além destas ligações, a câmara 3D D455 *Intel Realsense* está ligada ao computador por cabo USB. O algoritmo de visão recebe informações pela câmara, processa a informação e envia mensagens para o Arduino por conexão serial que as computariza para os servos movimentarem.

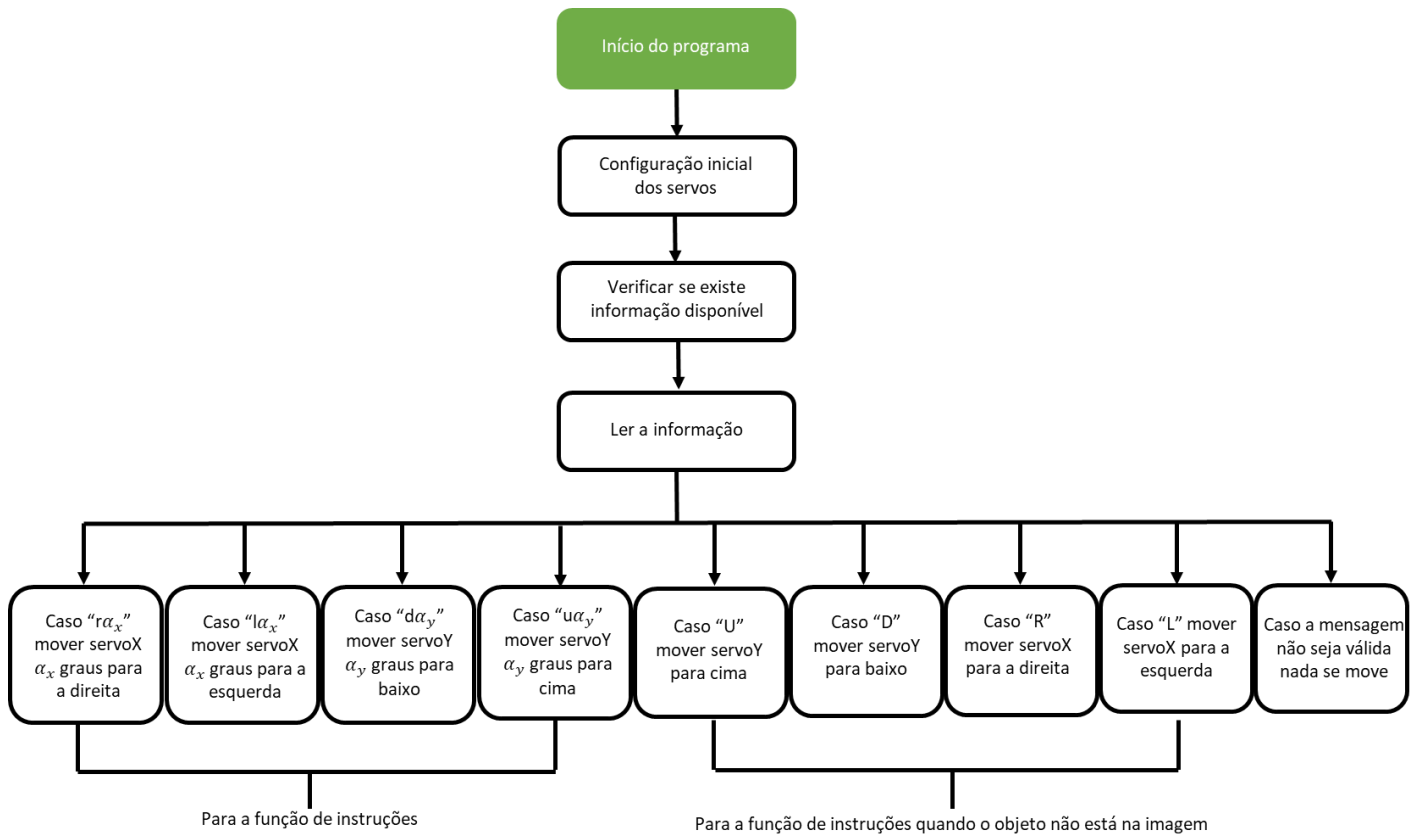
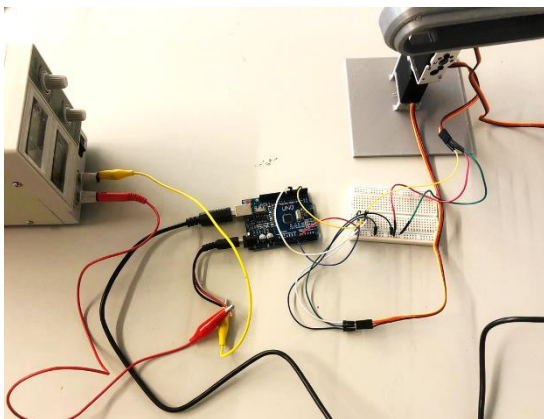
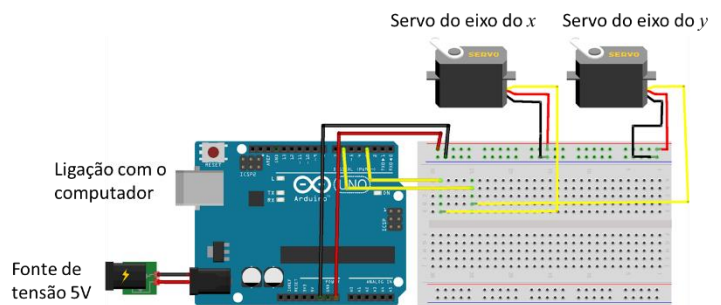


Figura 4.8 – Representação esquemática do programa construído para o Arduino.



(a)



(b)

Figura 4.9 – Ligações do Sistema de controlo(a) Foto da ligação do Arduino com a fonte de tensão, os servos e o computador;(b) Esquema representativo da ligação do Arduino com a fonte de tensão, os servos e computador.

4.5. TESTES EXPERIMENTAIS

De modo a validar o movimento do pescoço em relação ao objeto a detetar/rastrear, foi necessária a realização de testes experimentais que demonstrassem rigorosamente qual o desvio entre a posição e velocidade real do objeto e a posição e velocidade do pescoço.

O teste experimental realizado consistiu na utilização de um servo MG995 e uma garra ligada a este, que segura o objeto, neste caso uma bola de ping-pong azul, produzindo um movimento controlado, que apresenta sempre a mesma velocidade e intervalo de posições.

A garra foi modelada utilizando o *software SolidWorks* e teve como processo de manufatura impressão 3D. O resultado final está representado na Figura 4.10.

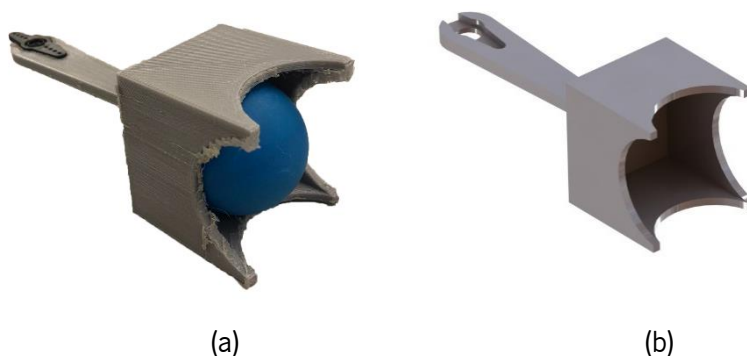


Figura 4.10 – Garra do objeto para testes experimentais. (a) Construção final da garra; (b) Modelação da garra em *SolidWorks*.

Relativamente aos restantes componentes, estes correspondem a um Arduino UNO, um servo MG995, uma engrenagem e cabos de ligação. Na Figura 4.11 estão exibidas fotos do servo e da engrenagem utilizada.

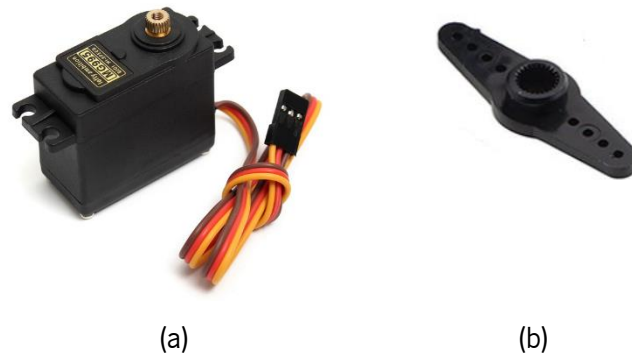


Figura 4.11 – Servo e engrenagem utilizados no dispositivo de testes experimentais (a) Servo MG995; (b) Engrenagem [52].

O servo MG995 foi ligado a um Arduino UNO e programado para realizar um movimento contínuo dos 50° aos 110° e vice-versa, a três velocidades, v_{objeto} , diferentes, $16,6^\circ/s$, $25^\circ/s$ e $50^\circ/s$. O esquema de ligação deste ao Arduino está presente na Figura 4.12.

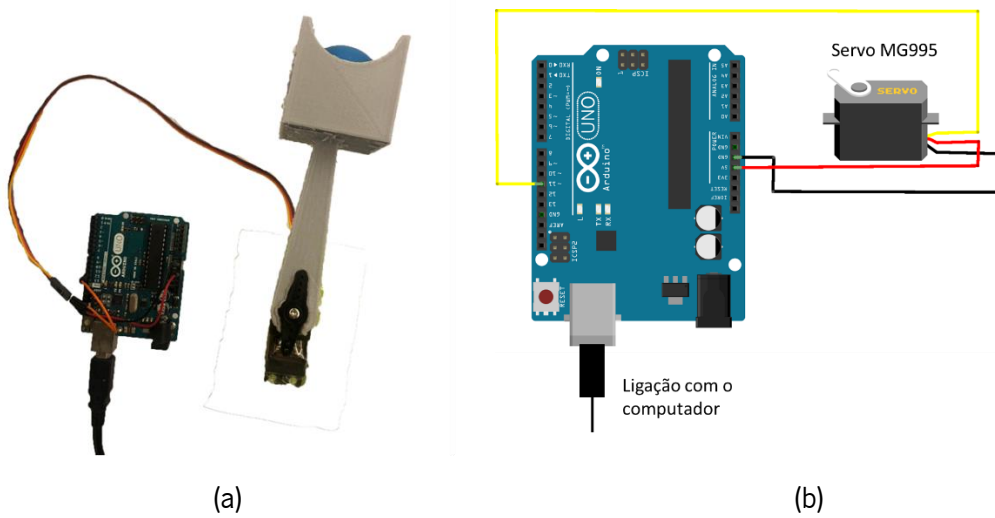


Figura 4.12 – Esquema de ligação dos componentes do dispositivo de testes experimentais. (a) Foto da ligação; (b) Figura esquemática da ligação.

Após a montagem, o pescoço foi colocado diretamente em frente do dispositivo de testes, a uma distância de 24 cm, e diferentes valores de constantes para as equações (16) e (17) foram testados no algoritmo de visão.

A avaliação da performance de diferentes constantes foi feita através de iterações e criação de dois tipos de gráficos. Nomeadamente, gráficos de variação de distância do centro objeto ao centro da imagem, em pixels e gráficos de variação da velocidade do objeto, em pixels por segundo. Cada iteração tem a duração de 20 segundos e a média dos valores da distância, d_m , e da velocidade, v_m , foi calculada e adicionada ao gráfico. Foram utilizadas três velocidades diferentes do dispositivo, pois para diferentes velocidades a performance das constantes varia.

Os valores de ambos d_m e v_m devem-se aproximar do valor de zero. Isto deve-se ao facto de que, se o pescoço estiver a seguir fielmente o objeto a distância média calculada entre os centros do objeto e imagem será diminuta, o mesmo acontecerá para a velocidade, já que esta depende da distância entre o centro do objeto na imagem atual e o centro do objeto na imagem anterior. No entanto, para que o pescoço se movimente, é necessário a deteção de uma diferença mínima de posições do objeto pelo algoritmo de visão por computador, pelo que d_m e v_m nunca serão zero.

Como o dispositivo de testes apenas se movimenta num eixo, as iterações foram realizadas separadamente para o eixo do x e para o eixo do y .

Analisando as equações (16) e (17), as constantes, K_1 e K_3 , estão diretamente relacionadas com a distância média, d_m , visto que se multiplicam pela distância do centro do objeto ao centro da imagem em cada instante. Da mesma forma, as constantes K_2 e K_4 , estão diretamente relacionadas com velocidade média, v_m . Portanto os valores destas constantes serão escolhidos através da média dos melhores valores conseguidos para d_m e v_m .

A Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam os resultados obtidos nos testes experimentais.

Tabela 4.2 – Resultados dos testes experimentais para o eixo do x .

Eixo do x					
Constantes			$v_{objeto} (^{\circ}/s)$		
			16,6	25	50
K_1 K_2	0,01	d_m v_m	96	90	92
	0,004		54	75	146
	0,02		48	60	69
	0,005		80	89	150
	0,03		35	40	54
	0,006		83	109	174
	0,04		65	67	70
			337	178	326
Constantes com melhor performance			$K_1 = 0,03$ $K_2 = 0,005$	$K_1 = 0,03$ $K_2 = 0,004$	$K_1 = 0,03$ $K_2 = 0,004$
					Média
					$K_1 = 0,03$ $K_2 = 0,0043$

Tabela 4.3 - Resultados dos testes experimentais para o eixo do y .

Eixo do y					
Constantes			$v_{objeto} (^{\circ}/s)$		
			16,6	25	50
K_3 K_4	0,01	d_m v_m	81	75	99
	0,004		69	99	188
	0,02		48	49	66
	0,005		85	111	178
	0,03		40	41	50
	0,006		84	118	186
	0,04		116	85	99
			603	484	528
Constantes com melhor performance			$K_3 = 0,03$ $K_4 = 0,004$	$K_3 = 0,03$ $K_4 = 0,004$	$K_3 = 0,03$ $K_4 = 0,005$
					Média
					$K_3 = 0,03$ $K_4 = 0,0043$

Assim, conclui-se os seguintes valores ótimos para as constantes das equações (16) e (17) :

$$K_1 = 0,03$$

$$K_2 = 0,0043$$

$$K_3 = 0,03$$

$$K_4 = 0,0043$$

Analisando a Tabela 4.2 e Tabela 4.3, é possível aferir que, para valores de constantes demasiado baixos e demasiado altos, os valores de d_m aumentam. Isto acontece por duas razões, quando K_1 e K_3 são demasiado baixos, os valores de α_x e α_y enviados para os Arduino não são suficientemente elevados para levar a uma aproximação coerente ao centro do objeto, levando a um aumento da distância média. Quando K_1 e K_3 são demasiado elevados, os valores α_x e α_y enviados, provocam uma deslocação excessiva da posição do pescoço, não conseguindo manter uma distância diminuta ao centro do objeto.

Comparando gráficos obtidos, para o eixo do x , utilizando as constantes ótimas e constantes com má performance (Figura 4.13 e Figura 4.12) é clara a diferença na qualidade de atuação do pescoço de CHARMIE.

Para os K 's ótimos, o valor máximo da distância e velocidade corresponde ao início do programa, quando a visão está à procura do objeto, no entanto o valor da distância mantém-se reduzida ao longo do movimento, provando um bom rastreamento.

Quando os K 's não são ótimos, o valor máximo da distância e velocidade mantém-se altoe apresentam picos irregulares. Isto acontece devido à atribuição de constantes demasiado elevadas referida acima, não permitindo um rastreamento cuidado. Os resultados no eixo do y seguem a mesma lógica.

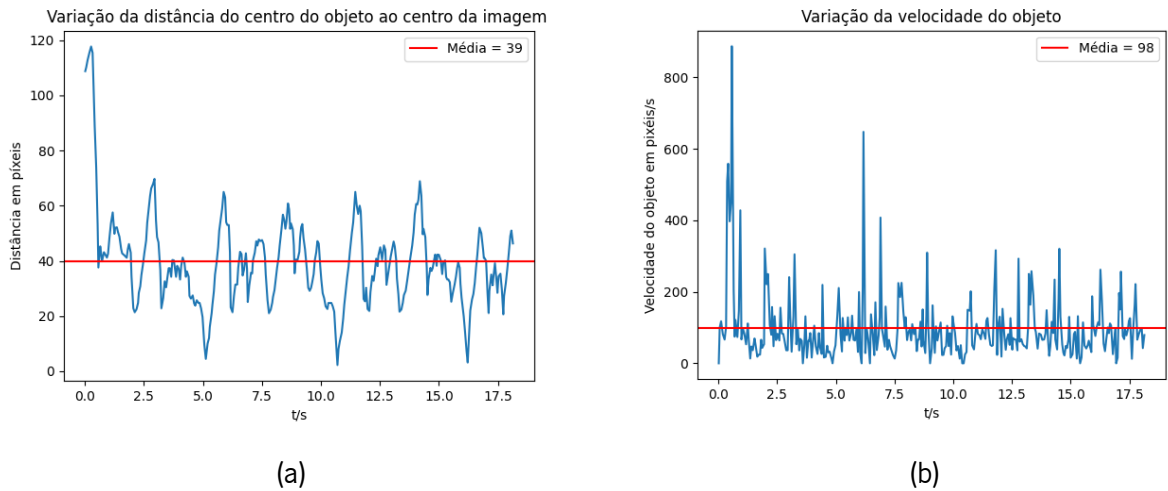
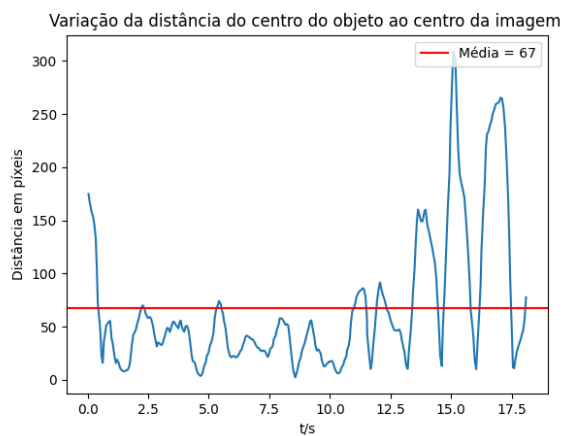
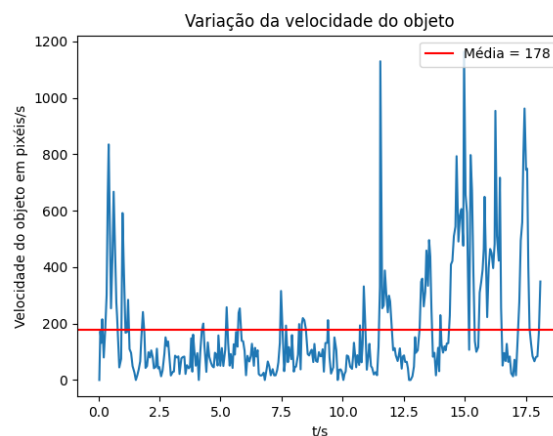


Figura 4.13 – Teste experimental utilizando as constantes ótimas, usando uma velocidade de $25^\circ/\text{s}$ ($K_1 = 0,03$; $K_2 = 0,0043$; $K_3 = 0,03$; $K_4 = 0,0043$).



(a)



(b)

Figura 4.14 - Teste experimental utilizando as constantes com má performance, usando uma velocidade de $25^\circ/\text{s}$ ($K_1 = 0,04$; $K_2 = 0,007$; $K_3 = 0,04$; $K_4 = 0,007$).

4.6. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo permitiu a inferir algumas conclusões não esperadas aquando do projeto mecânico, bem como a exploração de novos *software* e modos de controlo.

Em primeiro lugar, foi depreendido que a utilização de um servo para a realização do movimento de *roll*, não tinha interferência significativa na capacidade do pescoço de detetar e rastrear objetos e a sua inclusão tornaria o controlo bastante mais complexo. Ainda assim, a cinemática direta e o espaço de trabalho foram calculados para a utilização dos 3 servos, já que a inclusão deste deve ser um trabalho futuro para um pescoço mais completo e fiel antropomorficamente.

Apesar da familiaridade com as linguagens de *Python* e *Arduino*, a utilização destas duas juntamente num novo contexto, permitiu adquirir novas capacidades, através da utilização de novas bibliotecas e modos de organização de pensamento e algoritmia.

Os testes experimentais permitiram a escolha adequada das constantes para a equação de posição de movimento, bem como a análise do comportamento do pescoço ao longo de um ciclo de utilização.

Por fim, o protótipo final do pescoço preenche os objetivos iniciais propostos, conseguindo reproduzir os movimentos do pescoço humano bem como detetar e rastrear um objeto, apresentando baixo custo, baixa complexidade e baixa massa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização da presente dissertação pode-se considerar que de um modo geral os objetivos propostos foram alcançados, cumprindo o objetivo principal, a construção de um pescoço antropomórfico capaz de detetar e rastrear objetos. Neste capítulo, serão abordadas as conclusões retiradas no decorrer da realização deste projeto bem como quais as perspectivas e trabalhos futuros em relação a este tema.

5.1. CONCLUSÕES

Durante a etapa de pesquisa e revisão bibliográfica do tema foi evidente a existência de bastante informação no mesmo tópico que a presente dissertação, havendo a possibilidade de estudo de várias soluções já implementadas

A etapa mais longa foi a do projeto mecânico, devido à necessidade de construção de um novo modelo de pescoço, repetindo todo o seu processo. Apesar de um dos requisitos iniciais ser a utilização de dois servos *Dynamixel MX-64T*, o mesmo não foi possível, estes revelaram-se incompatíveis com o Arduino, mesmo após a aplicação de diferentes técnicas e tentativas. Não obstante, a construção do pescoço foi terminada a tempo, chegando a um resultado equivalente, sendo uma solução de baixo custo, modular, baixo peso, segura, com baixa complexidade e com uma altura mais próxima da altura de um pescoço humano do que do primeiro modelo. A massa do protótipo final do pescoço revela-se mais baixa que as soluções existentes sendo um ponto a seu favor.

A última etapa, corresponde à realização do controlo do pescoço. Apesar do conhecimento básico em ambas as tecnologias de *Python* e Arduino, a sua ligação, bem como a utilização de visão por computador, permitiu adquirir novas competências. Devido à complexidade da tarefa, inicialmente os algoritmos foram programados para a utilização de apenas dois servos, um que se movimenta no eixo do x e outro que se movimenta no eixo do y . No entanto, isto provou que o pescoço conseguia realizar todo o tipo de movimentos necessário para a deteção/rastreamento da posição de um objeto de uma maneira completa, levando à conclusão de que a utilização do eixo do *roll* era dispensável. Caso fosse necessário rastrear a orientação do objeto, para além da sua posição, então a utilização desse servo tornar-se-ia relevante.

Portanto, apesar da existência de três servos no pescoço de CHARMIE, o seu controlo apenas utiliza dois destes, correspondentes aos *yaw* e ao *pitch*.

Os testes experimentais revelaram-se importantes no aperfeiçoamento do movimento do pescoço de CHARMIE para uma deteção e rastreamento mais correto. Outro aspeto, foi a possibilidade de analisar os padrões de movimento deste em cada ciclo de utilização.

O controlo final do pescoço revela-se como competente, suave e preenche os objetivos desejados.

5.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Embora os objetivos da dissertação tenham sido alcançados, existe ainda possibilidade de trabalhos futuros com vista à melhoria do pescoço de CHARMIE.

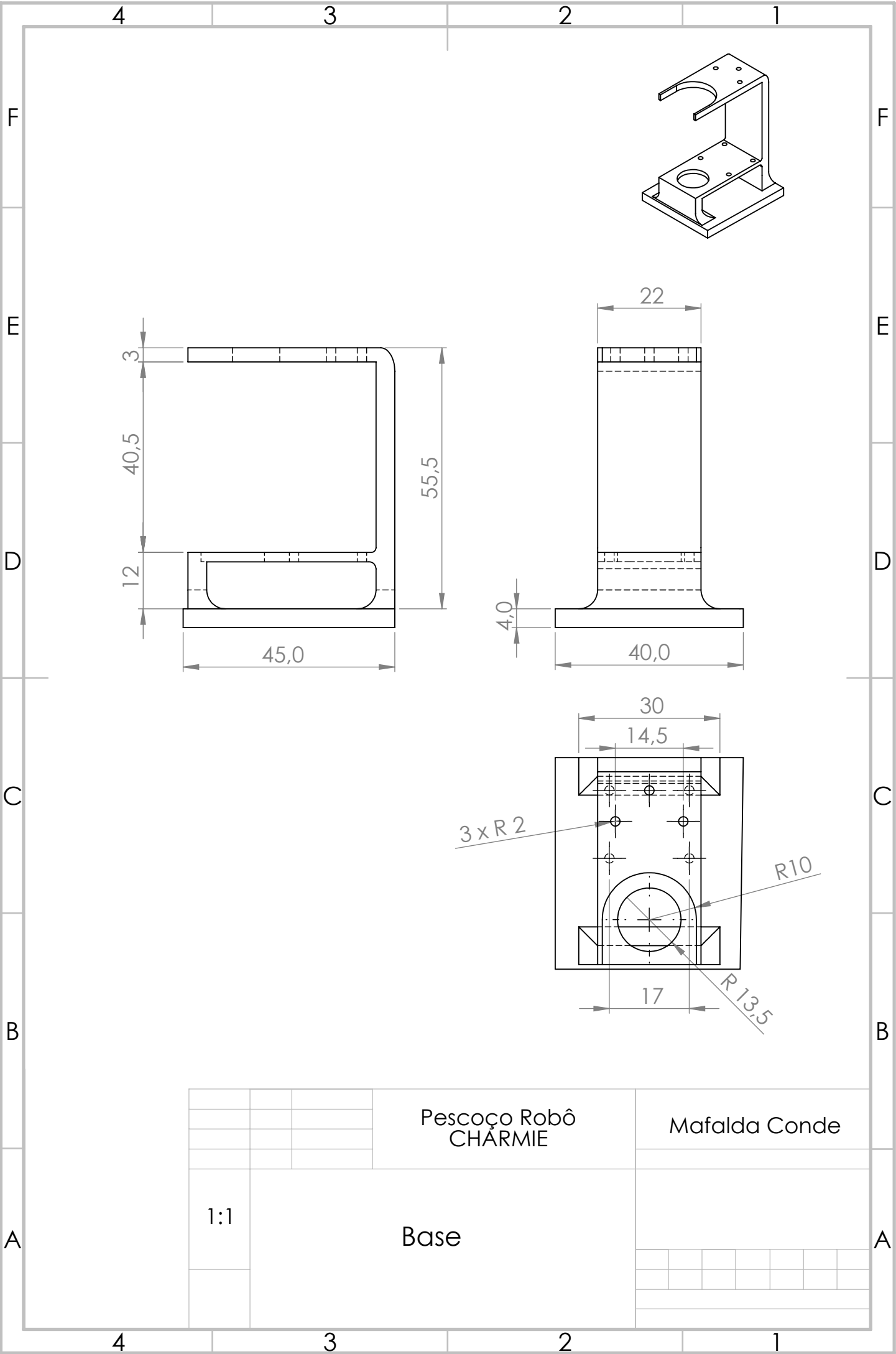
Seria interessante explorar o uso do servo que realiza o movimento de *roll*, averiguando o seu efeito na deteção e rastreamento de objetos, quando comparado com o uso apenas dos servos do *pitch* e do *yaw*, bem como o seu efeito na aparência do movimento, isto é, se o movimento se torna mais antropomórfico.

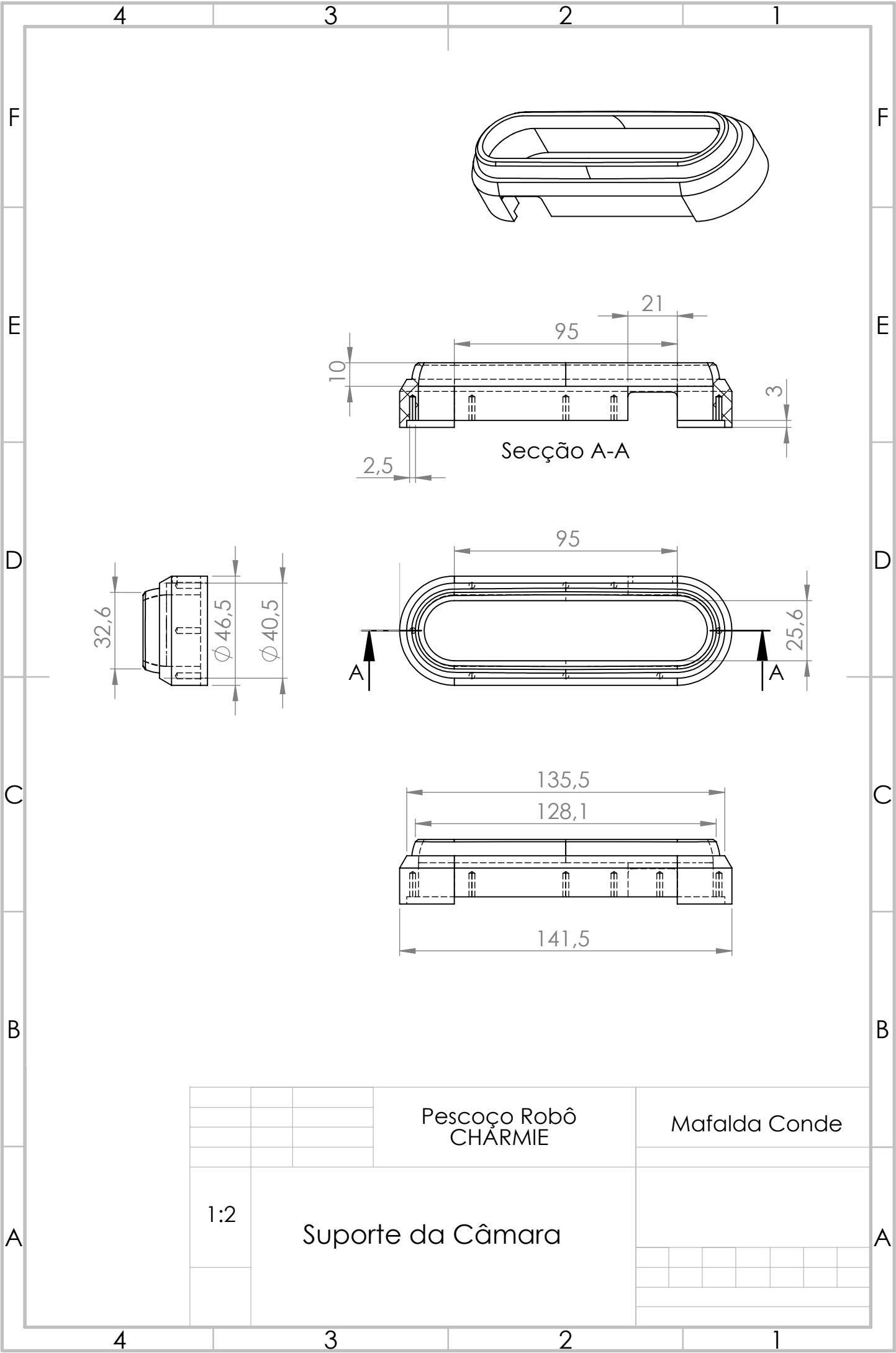
Outra propriedade passível de melhoria são as constantes ligadas às equações de posição e velocidade do pescoço. Apesar da sua progressão através dos testes experimentais, um estudo mais aprofundado é ainda possível, com mais tipos de testes e utilização de funções e algoritmos de otimização para atribuição das constantes.

Outro trabalho futuro interessante é modelação e construção de uma carcaça para o mecanismo do pescoço de CHARMIE que apresente as proporções de um pescoço humano presentes na Tabela 2.3, tornando o seu aspeto mais apelativo e antropomórfico.

Por fim, um importante trabalho futuro será a ligação do sistema construído ao resto do corpo do CHARMIE, tanto em termos de ligações mecânicas como eletrónicas

APÊNDICE I – DESENHOS TÉCNICOS DE APOIO





APÊNDICE II – ALGORITMOS UTILIZADOS

A consulta dos algoritmos desenvolvidos para o controlo do pescoço de CHARMIE pode ser efetuada em: <https://github.com/MafaldaConde/Thesis-Code.git>.

A pasta contém três ficheiros, nomeadamente “vision_code”, que apresenta o algoritmo utilizado na visão por computador, “color_finder”, um algoritmo criado para auxiliar o utilizador a encontrar os valores de HSV da cor do objeto a rastrear e “servo_control”, o algoritmo desenvolvido para o Arduino que permite o controlo adequado dos servos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Lizhong and S. Jianbo, "Gaze control on humanoid robot head," in *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2006, vol. 2, pp. 9144–9148. doi: 10.1109/WCICA.2006.1713769.
- [2] R. Beira *et al.*, "Design of the robot-cub (iCub) head," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, vol. 2006, pp. 94–100. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641167.
- [3] M. Muthugala, M. K. B. S. Munasinghe, M. H. C. Lakshan, L. H. H. Madurangi, and A. G. B. P. Jayasekara, "Design of an interactive robotic head with human-like movements," in *2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIIS 2013 - Conference Proceedings*, 2013, pp. 355–360. doi: 10.1109/ICIIIS.2013.6732009.
- [4] T. Ribeiro, F. Gonçalves, I. S. Garcia, G. Lopes, and A. F. Ribeiro, "CHARMIE: A collaborative healthcare and home service and assistant robot for elderly care," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11167248.
- [5] A. Konno *et al.*, "Development of a Humanoid Robot Saiku".
- [6] A. , and S. B. Albers, "Mechatronic design of a humanoid robot in an educational project," *the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia*, 2005.
- [7] R. S. and G. H. C. Pradalier, "Cybernetic Human HRP-4C: A Humanoid Robot with Human-Like Proportions," *STAR*, vol. 70, pp. 301–314, 2011.
- [8] "This week in The History of AI at AIWS.net – Waseda University builds WABOT-1 | AIWS.net," Jan. 21, 2021. <https://aiws.net/the-history-of-ai/this-week-in-the-history-of-ai-at-aiws-net-waseda-university-builds-wabot-1/> (accessed Aug. 30, 2022).
- [9] "Wabot 2 - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics." <https://robots.ieee.org/robots/wabot/> (accessed Aug. 30, 2022).
- [10] R. Beira, "Mechanical Design of an Anthropomorphic Robot Head," UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, Lisboa, 2008.
- [11] "Qrio - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics." <https://robots.ieee.org/robots/qrio/> (accessed Aug. 30, 2022).
- [12] Y. Ogura *et al.*, "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, vol. 2006, pp. 76–81. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641164.

- [13] “Biped Humanoid Robot.”
http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/wabian/wabian2_2LL/wabian2_2LL.htm (accessed Aug. 30, 2022).
- [14] M. Penčić, M. Čavić, S. Savić, M. Rackov, B. Borovac, and Z. Lu, “Assistive humanoid robot MARKO: development of the neck mechanism.”
- [15] B. Gao, N. Xi, Y. Shen, J. Zhao, and R. Yang, “Development of a low motion-noise humanoid neck: Statics analysis and experimental validation,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 1203–1208. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509551.
- [16] F. H. Netter, *Netter: Atlas of Human Anatomy*, 6th ed. Philadelphia: Saunders, 2014.
- [17] D. M. Brouwer, J. Bennik, J. Leideman, H. M. J. R. Soemers, and S. Stramigioli, “Mechatronic design of a fast and long range 4 degrees of freedom humanoid neck,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 574–579. doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152585.
- [18] V. Anita N, “Influence of Muscle Morphometry and Moment Arms on the Moment Generating Capacity of Human Neck Muscles,” vol. 23, no. 4, pp. 412–422, 1998.
- [19] C. C. Gordon *et al.*, “2012 ANTHROPOMETRIC SURVEY OF U.S. ARMY PERSONNEL: METHODS AND SUMMARY STATISTICS,” 2014.
- [20] G. S. Sharath, N. Hiremath, and G. Manjunatha, “Design and analysis of gantry robot for pick and place mechanism with Arduino Mega 2560 microcontroller and processed using pythons,” in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 45, pp. 377–384. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.965.
- [21] F. M. Lopez-Rodriguez and F. Cuesta, “An android and arduino based low-cost educational robot with applied intelligent control and machine learning,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–26, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11010048.
- [22] F. Ion Tiberiu Petrescu and R. Victoria Virgil Petrescu, “Direct and inverse kinematics to the anthropomorphic robots,” no. 1, pp. 109–124, 2016.
- [23] P. Flores, “Concepts and Formulations for Spatial Multibody Dynamics.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/282185685>
- [24] P. Victor, G. Santos, and M. Dutra, “Cinemática Direta e Inversa de um Novo Robô Híbrido Paralelo-Serial para Simulação da Transferência de Carga Offshore WalkingMachinesViewprojectExoskeletonViewproject,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344611412>

- [25] A. Voulodimos, N. Doulamis, A. Doulamis, and E. Protopapadakis, “Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,” 2018.
- [26] P. Wan, A. Toudeshki, H. Tan, and R. Ehsani, “A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision,” *Comput Electron Agric*, vol. 146, pp. 43–50, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.01.011.
- [27] N. Gonçalves, V. Carvalho, M. Belsley, R. M. Vasconcelos, F. O. Soares, and J. Machado, “Yarn features extraction using image processing and computer vision - A study with cotton and polyester yarns,” *Measurement (Lond)*, vol. 68, pp. 1–15, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.010.
- [28] Ayache Nicholas, “Medical computer vision, virtual reality and robotics,” *Image Vis Comput*, vol. 13, no. 4, pp. 295–313, 1995.
- [29] J. W. ; M. M. J. ; A. J. K. COURTNEY, “ Robot guidance using computer vision,” *Pattern Recognit*, vol. 17., no. 6, pp. 585–592, 1984.
- [30] A. F. , Ribeiro, “MACHINE VISION FOR INDUSTRY,” *Departamento de Electrónica Industria*, pp. 1–7.
- [31] A. S. , S. F. M. Q. i Silva, “Object Tracking by Color and Active Contour Models Segmentation,” *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 14, no. 3, pp. 1488–1493, Mar. 2016.
- [32] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2015 12th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS) : proceedings : Brussels, Belgium, August 25-28, 2015*.
- [33] P. Fernandes, “Sistema de Controlo de Soldadura baseado em visão por computadores,” Universidade do Minho, Guimarães, 2015.
- [34] P. Miguel and P. Fernandes, “Universidade do Minho Escola de Engenharia.”
- [35] “OpenCV Python Image Smoothing - Gaussian Blur.” <https://www.tutorialkart.com/opencv/python/opencv-python-gaussian-image-smoothing/> (accessed Oct. 10, 2022).
- [36] “OpenCV: Contours : Getting Started.” https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html (accessed Aug. 31, 2022).
- [37] “OpenCV Contour Approximation - PyImageSearch.” <https://pyimagesearch.com/2021/10/06/opencv-contour-approximation/> (accessed Aug. 31, 2022).

- [38] “Find Center of a Blob (Centroid) Using OpenCV (C++/Python) | LearnOpenCV.” <https://learnopencv.com/find-center-of-blob-centroid-using-opencv-cpp-python/> (accessed Aug. 31, 2022).
- [39] “Python OpenCV | cv2.circle() method - GeeksforGeeks.” <https://www.geeksforgeeks.org/python-opencv-cv2-circle-method/> (accessed Aug. 31, 2022).
- [40] “OpenCV: Image Moments.” https://docs.opencv.org/4.x/d0/d49/tutorial_moments.html (accessed Aug. 31, 2022).
- [41] “II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS”.
- [42] G. de Robótica, “Introdução ao arduino,” *Notas de aula, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul*, vol. 10, 2012.
- [43] “Arduino A000066 - Arduino UNO Rev.3 Original ('A000066'," ARD-0032',"AR-UNO',"LCA1001").” <https://www.electronicaembajadores.com/pt/Productos/Detalle/LCA1001/modulos-eletronicos/arduino/arduino-a000066-arduino-uno-rev-3-original> (accessed Aug. 31, 2022).
- [44] L. Blessing and N. Upton, “A methodology for preliminary design of mechanical aircraft systems,” in *World Aviation Congress, 1997*, 1997. doi: 10.2514/6.1997-5537.
- [45] “Anatomia da cabeça e do pescoço,” *Kenhub*, Accessed: Sep. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.kenhub.com/pt/library/anatomia/anatomia-da-cabeca-e-do-pescoco>
- [46] “Câmera de profundidade Intel RealSense D455: duas vezes mais alcance e melhor desempenho (EnglishOnly) | Sala de Imprensa Intel Brasil.” <https://newsroom.intel.com.br/news/camera-de-profundidade-intel-realsense-d455-duas-vezes-mais-alcance-e-melhor-desempenho-english-only/#gs.axm3og> (accessed Sep. 01, 2022).
- [47] “▶ MakerBot Replicator 2 • best Price • Technical specifications.” https://shopping.mercatos.com/en/makerbot-replicator-2-fused-filament-fabrication-fff-black-3d-printer_pid4432582.html (accessed Oct. 20, 2022).
- [48] R. Beira, D. José Alberto Rosado dos Santos Victor Júri Presidente, D. José Alberto Rosado dos Santos Victor Vogais, and D. Hélder de Jesus Araújo Doutor Alexandre José Malheiro Bernardino Doutor Arlindo José de Pinho Figueiredo Silva, “UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO Mechanical Design of an Anthropomorphic Robot Head Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Concepção,” 2008.
- [49] “DYNAMIXEL MX-64 FR05-S101 Set | MYBOTSHOP.DE, 20,95 €.” https://www.mybotshop.de/DYNAMIXEL-MX-64-FR05-S101-Set_1 (accessed Sep. 13, 2022).

- [50] R. Sá Torres, “Dinâmica de um Robô Móvel Hexápode: Controlo e Otimização.,” Universidade do Minho, Guimarães, 2021.
- [51] “PySerial - Python Wiki.” <https://wiki.python.org/moin/PySerial> (accessed Oct. 08, 2022).
- [52] “MG995 Metal Gear Servo Motor-180 Degrees Tower Pro | Sharvielectronics: Best Online Electronic Products Bangalore.” <https://sharvielectronics.com/product/mg995-metal-gear-servo-motor-180-degrees-tower-pro/> (accessed Nov. 16, 2022).
- [53] “DYNAMIXEL MX-64 FR05-H101K | MYBOTSHOP.DE, 42,95 €.” https://www.mybotshop.de/DYNAMIXEL-MX-64-FR05-H101K-Set_1 (accessed Sep. 13, 2022).